

**ANALYSES MULTIDISCIPLINAIRES DE LA MOUSSON
AFRICAIN (AMMA)
AFRICAN MONSOON MULTIDISCIPLINARY ANALYSIS**



**Plan Scientifique et d'implémentation National du Sénégal (PSN)
Senegal National Science and Implementation Plan (SENSIP)**

31 décembre 2004

**ANALYSES MULTIDISCIPLINAIRES DE LA MOUSSON AFRICAINE (AMMA)
AFRICAN MONSOON MULTIDISCIPLINARY ANALYSIS**

Plan Scientifique et d'implémentation National du Sénégal (PSN)
Senegal National Science and Implementation Plan (SENSIP)

SOMMAIRE

MOTIVATION

**SECTION 1 : CONTEXTE PHYSIQUE : SYSTEME CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE
DU SENEGAL**

INTRODUCTION

I – 1 RELIEF ET SOLS

I –2 GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

I-3 HYDROLOGIE

I-4 CLIMAT

I-5 VEGETATION ET FAUNE

CONCLUSION

SECTION 2 : GROUPES THEMATIQUES ET PROPOSITIONS D'ETUDES

II-1 RESEAU D'OBSERVATION DU SENEGAL

II-1-1 LE RESEAU D'OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES

II-1-2 COLLECTE ET RETRANSMISSION DES DONNEES DE BASE

II-1-3 CRITIQUES DU RESEAU ET RECOMMANDATIONS

II-2 ESTIMATION DES PLUIES PAR RADAR ET SATELLITE

II-2-1 OBJECTIFS GENERAUX

II-2-2 OBJECTIFS SPECIFIQUES

II-2-3 METHODOLOGIE ET DONNEES UTILISEES

II-2-4 PROJETS DE RECHERCHE

II-2-5 RESULTATS ATTENDUS

II-2-6 RESSOURCES ET COMPETENCES DANS LE DOMAINE DE L'ESTIMATION DES
PLUIES

II-2-7 CHRONOGRAMME

II-2-8 COLLABORATIONS

II-2-9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II-2-10 BUDGET

II-3 DYNAMIQUE DES SYSTEMES CONECTIFS DE MESO-ECHELLE (MCS)

II-3-1 INTRODUCTION /PROBLEMATIQUE

II-3-2 BUT

II-3-3 OBJECTIFS SPECIFIQUES

II-3-4 OUTILS ET METHODOLOGIE

II-3-5 PROJETS DE RECHERCHE ET PERSONNES IMPLIQUEES

II-3-6 RESULTATS ATTENDUS

II-3-7 CHROGRAMME

II-3-8 BUDGET

II-3-9 BIBLIOGRAPHIE

II-4 AEROSOLS- CHIMIE- PROCESSUS RADIATIFS- POLLUTION

II-4-1 INTRODUCTION

II-4-2 OBJECTIFS GENERAUX

II-4-3 Proposition 1 : LA VISIBILITE CLIMATOLOGIQUE EN EPISODE CHASSE SABLE
AU SAHEL

II-4-4 Proposition 2 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET OPTIQUES DE L'AEROSOL
SAHARIEN

II-4-5 Proposition 3 : CHIMIE DE L'ATMOSPHERE ET DE L'EAU DE PLUIE

II-4-6 Proposition 4 : POLLUTION (Projet POLCA)

II-4-7 RESSOURCES ET COMPETENCES (Propositions 1, 2, 3)

II-4-8 BUDGET (propositions 1, 2)

II-4-9 CHRONOGRAMME

II-5 MODELISATION ET PREVISIONS

II-5-1 MODELISATION ET PREVISION ET PREVISION A COURTE ECHEANCE

II-5-2 PHASES DE AMMA CONCERNEES : SOP

II-5-3 PREVISION SAISONNIERE

II-5-4 PHASES AMMA CONCERNES : LOP, EOP

II-5-5 MODELISATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU SAHEL

II-5-6 PHASES DE AMMA CONCERNEES : LOP

II-6 MODELISATION DE L'UPWELLING SENEGALO-MAURITANIEN

II-6-1 INTRODUCTION

II-6-2 PROBLEMATIQUE

II-6-3 LES OBJECTIFS GENERAUX

II-6-4 LES OBJECTIFS SPECIFIQUES

II-6-5 LES APPROCHES UTILISEES

II-6-6 COLLABORATIONS

II-6-7 CHRONOGRAMME

II-6-8 BUDGET

II-7 IMPACTS DE LA MOUSSON SUR LE PASTORALISME.

II-7-1 INTRODUCTION

II-7-2 LES OBJETS D'ETUDE

II-7-3 OBJECTIFS

II-7-4 EQUIPE IMPLIQUE DANS LA MISE EN ŒUVRE DU PROGRAMME

II-7-5 METHODOLOGIE

II-7-6 BUDGET

II-7-7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II-8 IMPACTS DE LA MOUSSON SUR LA SANTE

II-8-1 INTRODUCTION.

II-8-2 PROBLEMATIQUE.

II-8-3 OBJECTIFS DE L'ETUDE

II-8-4 SITE D'ETUDE

II-8-5 QUESTIONS POSEES

II-8-6 METHODOLOGIE

II-8-7 COLLABORATIONS EXTERIEURES

II-8-8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
II-8-9 CHRONOGRAMME
II-8-10 BUDGET

II-9 IMPACT DE LA MOUSSON SUR LES CULTURES AU SENEGAL

II-9-1 INTRODUCTION, CONTEXTE ET JUSTIFICATIFS
II-9-2 OBJECTIFS
II-9-3 METHODOLOGIE ET PLAN DE RECHERCHE
II-9-4 ACTIVITES
II-9-5 OUTILS D'INFORMATION SPATIALE SUR LA MOUSSON
II-9-6 RESULTATS ATTENDUS
II-9-7 BUDGET

II-9-8 CONTRIBUTION DES PARTENAIRES

II-10 GESTION DURABLE DES RICHESSES NATURELLES LITTORALES ET CÔTIÈRES Le littoral, région clef du développement économique pour les 30 prochaines années

II-10-1 LE LITTORAL : UN NOUVEL OBJET DE RECHERCHE ET DE GESTION
II-10-2 ACQUIS EN MATIERE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE SUR LES LITTORAUX
II-10-3 LES PRIORITES
II-10-4 MATERIEL SOLLICITE
II-10-8 BUDGET

II-11 EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE DES IMPACTS DE LA MOUSSON

II-11-1 IMPACT DE LA MOUSSON SUR LES CONDITIONS DE VIE DES SOCIETES SENEGALAISES
II-11-2 MACRO-CONOMIE
II-11-3 ASSURANCES AGRICOLES
II-11-4 RESSOURCES ET COMPETENCES DANS LA THEMATIQUE
II-11-5 BUDGET
II-11-6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II-12 PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES LIES À LA MOUSSON

II-12-1 PROBLEMATIQUE
II-12-2 JUSTIFICATIFS

II-12-3 OBJECTIFS GLOBAUX
II-12-4 OBJECTIFS SPECIFIQUES

II-12-5 METHODOLOGIE
II-12-6 RESULTATS ATTENDUS
II-12-7 PARAMETRES A OBSERVER ET COMPETENCES
II-12-8 COLLABORATION

II-12-9 CHRONOGRAMME
II-12-10 JUSTIFICATIFS DU BUDGET

SECTION 3 : STRATEGIE D'OBSERVATIONS ET IMPLEMENTATION

III-1 ECHELLE REGIONALE
III-2 ECHELLE NATIONALE

SECTION 4 : COMITE NATIONAL AMMA

INSTITUTIONS IMPLIQUEES
PERSONNES IMPLIQUEES

ANALYSES MULTIDISCIPLINAIRES DE LA MOUSSON AFRICAIN (AMMA) AFRICAN MONSOON MULTIDISCIPLINARY ANALYSIS

Plan Scientifique et d'implémentation National du Sénégal (PSN) Senegal National Science and Implementation Plan (SENSIP)

MOTIVATION

L'Afrique de l'Ouest, particulièrement le Sahel, a connu dans les années 1970 à 90 une sécheresse sévère et continue. Le Sahel est passé de conditions humides (entre 1950 et 60) à des conditions beaucoup plus sèches (entre 1970 et 90). Ce signal inter-décennal constitue l'un des plus forts observés au 20ème siècle. De fortes variations inter-annuelles se sont superposées à ce signal avec comme conséquence l'aggravation des impacts environnementaux et socio-économiques. L'ensemble du cycle de l'eau a été affecté, entraînant ainsi des conséquences désastreuses sur l'agriculture et la sécurité alimentaire.

Cette variabilité climatique d'une telle amplitude soulève des questions importantes pour le développement durable de toute la région. Beaucoup de recherches dans les décennies récentes se sont ainsi intéressées à ces questions. Malheureusement des lacunes fondamentales subsistent dans notre connaissance du système couplé atmosphère- terre- océan. Ces lacunes résultent de la faiblesse des observations et des modèles numériques actuels. Le réseau d'observations en plus de sa faiblesse n'est pas optimisé pour obtenir des prévisions fiables aux échelles saisonnières à interannuelles et de nombreux paramètres sont très peu documentés. Les modèles reproduisent mal les caractéristiques des cycles journalier et saisonnier des précipitations sur l'Afrique de l'Ouest et l'océan Atlantique tropical et les processus de méso-échelle de la Mousson d'Afrique de l'Ouest (MAO).

La MAO joue un rôle important dans l'équilibre énergétique global de notre planète et est associée à une des principales sources de chaleur d'origine continentale. La migration méridienne de cette source de chaleur et les circulations régionales associées ont un impact direct sur d'autres régions tropicales et des moyennes latitudes. Ceci est illustré par exemple par la corrélation connue entre les précipitations au Sahel et la fréquence des cyclones sur l'Atlantique.

D'autre part on trouve en Afrique de l'Ouest de vastes régions sources d'émissions des précurseurs de gaz à effet de serre (par exemple l'ozone et les aérosols). La combustion de la biomasse brûlant dans les écosystèmes africains de savane et de forêt contribue à environ 20% de la combustion totale de biomasse sur le globe. Le transport des aérosols sur l'océan Atlantique tropical est contrôlé par les processus météorologiques sur l'Afrique de l'Ouest et est aussi lié à la circulation de grande échelle. Le transport sur de longues distances des gaz trace hors de l'Afrique de l'Ouest a également des implications très significatives sur le changement global du climat et le transport vers la stratosphère de certains gaz essentiels tels que la vapeur d'eau et les espèces chimiques entrant dans le cycle de l'ozone.

C'est dans ce contexte que le programme AMMA a été initié par la communauté française des chercheurs en sciences de l'environnement planétaire en 2001 et a reçu le soutien financiers de plusieurs organismes : CNES, CNRS/INSU, IFREMER, IRD, METEO-France. Depuis AMMA est devenu un programme international avec la participation des scientifiques américains, européens et africains. Deux Ateliers AMMA se sont tenu en Afrique : Niamey (Niger) en 2001 et Cotonou (Bénin) en 2003 et ont permis de structurer la participation africaine dans AMMA (<http://www.ammanet.org>).

AMMA propose une nouvelle approche multidisciplinaire qui a pour but :

- (1) d'améliorer les connaissances de la Mousson Africaine et comprendre son influence sur les environnements physique, chimique et la biosphère aux échelles locale, régionale et globale.
- (2) de produire les connaissances permettant de lier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations d'Afrique de l'Ouest et définir les stratégies de surveillance appropriées.
- (3) de permettre l'intégration effective de la recherche multidisciplinaire à l'élaboration de prévisions et à la prise de décision.

Les objectifs scientifiques du programme AMMA sont décrits dans les documents de présentation du programme AMMA (<http://medias.obs-mip.fr>) et le document de Plan Scientifique américain (<http://www.joss.ucar.edu/amma>). Ces objectifs sont rappelés ici en quelques points :

(i) Connaissance Scientifique

Réaliser des recherches détaillées sur les processus physiques et chimiques influençant le système couplé terre- océan- atmosphère en Afrique de l'Ouest avec le but de quantifier tant les interactions au sein de ce système que les impacts sur le climat local, régional et global ; l'objectif est d'améliorer les prévisions météorologiques et les simulations du climat de l'Afrique de l'Ouest, que ce soient celles utilisées aux échelles- saisonnières ou aux échelles plus longues, par exemple pour produire des scénarii de changement du climat futur.

(ii) Implications socio-économiques

Caractériser l'impact de la variabilité du climat de l'Afrique de l'Ouest sur les ressources en eau, la sécurité alimentaire, la santé et les stratégies de développement et étudier la rétroaction des activités humaines sur la variabilité de climat, puisque la pression anthropique joue un rôle important dans la dégradation de la surface qui à son tour peut modifier la variabilité de précipitations.

(iii) Stratégies d'observation

Implanter un réseau intégré de mesures multi- échelles fournissant les paramètres clefs pour une recherche scientifique multidisciplinaire.

(iv) Formation en association avec les institutions africaines
Développer des activités intégrées de formation et d'éducation avec les autres institutions opérationnelles et de recherche en Afrique, avec l'aide des structures de recherche en Europe et aux Etats Unis.

(v) Système d'archivage à long terme

Développer une méta-base et des bases de données sur les thèmes du projet.

Le programme AMMA, pour offrir la possibilité de lier observations, analyse des données et modélisation à différentes échelles d'espace et de temps, comportera 3 parties :

- un volet expérimental;
- des applications étroitement liées à l'expérience ;

- la formation par la recherche.

Afin de fédérer et coordonner les interventions nationales dans ce cadre, un Comité National AMMA diversement composé, s'est constitué au Sénégal. Le Comité a pris l'initiative de produire un **Plan Scientifique et d'Implémentation National (PSN)** qui constitue à la fois une contribution au Plan d'Implémentation Africain (PIAF) et au Plan International.

En plus des objectifs scientifiques initiaux du programme AMMA, les objectifs visés à l'échelle nationale sont :

- l'amélioration des prévisions météorologiques et hydrologiques à différentes échelles ;
- l'évaluation des impacts sur les secteurs socio-économiques déterminés (agriculture, santé, ressources en eau, pastoralisme, ...) ;
- l'intégration des résultats des recherches multidisciplinaires à la prise de décision ;
- l'initiation d'un dialogue entre la communauté AMMA national et divers acteurs du secteur social et économique ;
- le développement des capacités humaines nationales sur ces sujets ;

La réalisation de ces objectifs passe par :

- le renforcement et l'amélioration des dispositifs d'observation et de mesure ;
- une meilleure compréhension de la mousson dans ses diverses composantes (atmosphère, biosphère, océan, hydrologie...) et à différentes échelles d'espace et temps ;
- le développement de la modélisation des différentes composantes de la MOA ;
- la synergie des actions nationales avec les efforts régionaux et l'initiative internationale ;
- une forte collaboration internationale.

Structure du plan scientifique et d'implémentation national (PSN)

Le plan scientifique et d'implémentation national (PSN) sera structuré comme suit :

Section 1 : Contexte physique : Système climatique et hydrologique du Sénégal

Section 2 : Groupes thématiques et propositions d'études

- Observations
- Estimation des pluies
- Dynamique des systèmes convectifs de méso-échelle (MCS)
- Aérosols- chimie- processus radiatifs
- Modélisation et prévisions
- Interactions océan- atmosphère
- Pastoralisme
- Santé- Environnement
- Agriculture
- Littoral
- Evaluation socio-économique
- Hydrologie

Section 3 : Stratégie d'observations et Implémentation (LOP- EOP- SOP et différentes zones)

Section 4 : Comité National AMMA : Composition

Section 5 : Implications du PSN dans le PIAF

Section 6 : Relations avec les communautés AMMA : Europe, USA

SECTION 1

CONTEXTE PHYSIQUE : SYSTEME CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE DU SENEGAL

INTRODUCTION

Le Sénégal est situé à l'extrémité ouest du continent africain, entre 12°18' et 16°42' de latitude nord, d'une part, et 11°30' et 17°32' de longitude ouest, d'autre part. Il couvre une superficie d'environ 197 722 km². Il est limité à l'ouest par l'Océan Atlantique, au nord et au nord-est par la Mauritanie, à l'est par le Mali et au sud par les deux Guinées : au sud-ouest par la Guinée-Bissau et au sud-est par la république de Guinée. La Gambie qui forme une enclave à l'intérieur du Sénégal sépare la partie sud (la Casamance) du reste du territoire.

Le pays, presque tout entier, est contenu dans la grande cuvette tertiaire sénégal-mauritanienne qui s'incline vers l'ouest. C'est, dans l'ensemble, un pays plat et peu accidenté formé de bas plateaux sur le bassin sédimentaire et de quelques hauteurs localisées dans la presqu'île du Cap-Vert, à l'ouest de la région de Thiès et au Sénégal Oriental.

Les précipitations annuelles qui augmentent du nord au sud, la relative densité du réseau hydrographique et le tapis végétal qui leur sont liés, offrent au pays des paysages naturels variés.

Les facteurs maritime et continental exercent une influence considérable sur tous les paramètres. L'influence du facteur maritime se manifeste directement sur les températures et l'humidité.

I – 1 RELIEF ET SOLS

Le modelé du Sénégal est, dans l'ensemble, plat et peu élevé. D'immenses bas plateaux s'étendent à perte de vue. Les altitudes sont partout inférieures à 130 m (Michel et Sall, 2000), sauf dans la partie sud-est où le relief devient plus accidenté et plus varié. La formation des sols dépend de l'importance des pluies qui augmentent du nord au sud mais d'autres facteurs interviennent au niveau régional et local, notamment la roche-mère et le modelé.

En raison de sa tectonique cassante, l'ouest du Sénégal (régions de Dakar et de Thiès) constitue l'une des régions les plus accidentées du pays. On y retrouve les collines des Mamelles constituées d'anciens massifs volcaniques, le massif de Ndiass correspondant au horst de grès maestrichtien (104 m) et la "falaise" de Thiès pouvant atteindre une centaine de mètres d'altitude. La région des "Niayes" en bordure du littoral de la Grande Côte comprend une série de dépressions interdunaires inondées par la nappe phréatique, riches en humus. Elle est une, par excellence, une zone de maraîchage.

Dans les vastes plateaux centraux, les sols se différencient progressivement du nord au sud en fonction de l'accroissement de la pluviométrie : sols brun-rouge, caractérisés par leur faible teneur en matières organiques autour du lac de Guiers et sur les plateaux du Ferlo nord. Leur épaisseur varie de 1 à 2 m. Du Ferlo central jusqu'aux environs de Diourbel-Bambey, en passant par le Cayor et Djolof, on retrouve des sols ferrugineux non lessivés ou sols "*dior*", terres de prédilection de l'arachide. Ils sont un peu plus profonds mais très sensibles à l'érosion. Dans les inter-dunes mal drainées se sont formés des sols hydromorphes plus riches en calcium et argile. Il s'agit des sols "*deck*". Des sols ferrugineux tropicaux lessivés qui apparaissent au Sine-Saloum et en Moyenne

Casamance sont également de bonnes terres à arachide. Dans la bas Saloum méridional et en Basse Casamance, se sont formés des sols ferrallitiques peu lessivés d'une épaisseur d'environ 3 m. Les bas plateaux de Thiès, du Ferlo oriental et méridional, de la Haute Casamance sont souvent recouverts d'une cuirasse ferrugineuse dont la fragmentation en surface a donné des sols caillouteux. Les bas plateaux de Mbour-Joal et de Matam (en bordure du fleuve Sénégal) portent des vertisols et des sols calcaires.

Le paysage le plus accidenté du Sénégal est situé au Sud-Est du pays, notamment dans la région de Tambacounda. Il s'agit des collines de Kédougou situées près de la frontière guinéenne qui culminent à environ 581 mètres d'altitude. Ces collines constituent les prolongements des contreforts du Fouta Djallon. Ces terrains, souvent couverts de cuirasses ferrugineuses et, dominés par quelques inselbergs, portent des sols caillouteux et des sols ferrugineux lessivés et des vertisols dans les plaines argileuses de la Falémé.

I –2 GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

La majeure partie du Sénégal appartient au grand bassin sédimentaire sénégal-mauritanien où sont entassés les dépôts du Secondaire et du Tertiaire. Le reste du pays, notamment la partie sud-est, est le domaine du socle précambrien et son recouvrement (Michel et Sall, 2000 ; ENS, 1989).

Le bassin sédimentaire est très vaste puisqu'il couvre les 4/5 du territoire sénégalais. Les couches géologiques qui se sont succédées du Maestrichtien (secondaire supérieur) au Miocène moyen (tertiaire) plongent doucement vers l'ouest si bien qu'elles atteignent 5 000 m autour de Saint-Louis et en Basse Casamance, 6 000 m à hauteur de Dakar. Elles se composent de calcaire, marnes et argiles. Elles sont couvertes sur la majeure partie du bassin par les dépôts gréseux du Continental Terminal. Ces dépôts de grès argileux bariolé ont une épaisseur variable qui atteint 150 m au Ferlo Central. Ils sont recouverts d'une cuirasse ferrugineuse. Le grès du Maestichtien n'apparaît que dans la presque île du Cap-Vert à la faveur d'un soulèvement tectonique entre Rufisque et Mbour : le horst de Ndiass. Partout, cette couche est recouverte par les sédiments du Tertiaire qui constituent un important aquifère évalué à près de 3 000 milliards de m³. Le bassin sédimentaire renferme des eaux souterraines à plusieurs niveaux : les nappes phréatiques se trouvent dans le grès du Continental Terminal ou dans les calcaires de l'Eocène (30–100 m de profondeur), la nappe maestrichtienne est profonde (100–350 m) et très importante dans tout le bassin. L'alimentation de la nappe s'effectue en partie par les crues du fleuve Sénégal, elle est en partie fossile. Dans la vallée alluviale du fleuve Sénégal et dans les golfes marins de Basse-Casamance et du Sine-Saloum, on retrouve divers types de sols hydromorphes. Les vasières basses sont régulièrement recouvertes par la marée tandis que les vasières hautes forment d'immenses étendues salées et dénudées communément appelées tannes.

Le socle précambrien est essentiellement localisé au Sénégal oriental. Il est composé de roches de faciès très variés, et légèrement métamorphisées : schistes, micaschistes, quartzites. Ces formations ont été recouvertes partiellement par des terrains sédimentaires d'âge primaire. Il s'agit des grès, grès quartzites et calcaires. Ces sédiments très anciens ont subi de violents plissements provoquant des cassures traversées par des roches volcaniques, des dolérites en particulier. Du fait de l'imperméabilité de ces formations géologiques, il n'y existe pas de nappe profonde et les rares nappes superficielles sont localisées au niveau des fissures ou des altérations superficielles de la roche.

I-3 HYDROLOGIE

Les eaux superficielles, courantes ou stagnantes, et les eaux souterraines dépendent directement ou indirectement des précipitations. Les fleuves, lacs et mares jouent un rôle très important dans la vie économique du pays puisque leurs eaux sont utilisées pour les cultures de décrue ou irriguées et pour abreuver le bétail. De même les nappes phréatiques ou profondes sont exploitées de plus en plus pour l'alimentation en eau des troupeaux, des villages et des villes.

I-3-1 L'hydrologie continentale

Tous les cours d'eau ont un régime tropical, marqué par une période annuelle de hautes eaux après le maximum pluviométrique, en août-septembre, et une période de basses eaux (Michel-Sall et Kane, 2000). Beaucoup de rivières tarissent dès février-mars et restent à sec jusqu'en juillet. Le Sénégal et la Gambie sont en eau toute l'année puisqu'ils sont alimentés par les pluies abondantes qui tombent sur les montagnes du Fouta Djallon. Mais leurs débits varient énormément au cours de l'année.

Long de 1800 km, le **fleuve Sénégal** prend sa source au Fouta-Djallon dans le nord de la république de Guinée. De sa source à l'embouchure, il traverse dans son parcours la partie occidentale du Mali et sert de frontière entre le Sénégal et la Mauritanie. Cette longue extension géographique lui soumet quatre domaines climatiques largement inspirés de la pluviométrie : les domaines guinéen, sud-soudanien, nord-soudanien et sahélien.

Long d'environ 1150 km (dont 477 km au Sénégal), le **fleuve Gambie** est né en Guinée sous le nom de *Dimma* à 1125 m sur les hauteurs du Fouta Djallon au nord de Labé. Avec un bassin versant de 77100 km², il constitue le deuxième grand fleuve du réseau hydrographique sénégalais. La partie sénégalaise du fleuve concerne l'aval de son bassin continental. Le bief amont et la partie maritime sont respectivement situés en Guinée et en Gambie. Le régime hydrologique du fleuve Gambie se caractérise sur l'ensemble de son cours par une saison de hautes eaux de juillet à début octobre et par une saison de basses eaux de début décembre à début juin.

Le fleuve Casamance, situé intégralement en territoire sénégalais, possède un bassin versant qui couvre une superficie de 20150 km². Il est formé par la réunion de plusieurs petits marigots souvent à sec en saison sèche. Il reçoit plusieurs affluents dont le plus important est le Soungrougrou formé par la réunion de plusieurs petits affluents qui prennent naissance dans la région des forêts de Pata et de Guimara.

La Kayanga est une rivière qui prend sa source en Guinée où elle prend le nom de Geba, traverse le sud-ouest du territoire sénégalais avant de rejoindre la Guinée-Bissau. Elle draine en territoire sénégalais, avec son affluent l'Anambé, un bassin versant de 1.100 km². Le régime hydrologique de ce fleuve est de type tropical humide du fait qu'il se situe dans les domaines climatiques sud-soudanien et guinéen.

Dans les régions du Centre-Ouest (Diourbel, Kaolack) l'écoulement superficiel est sporadique ou nul : ce sont donc des régions surtout aréiques. Elles sont traversées par les vallées mortes du **Sine** et du **Saloum**. La fréquence des niveaux calcaires et les sables dunaires, très perméables, favorisent les infiltrations des eaux. Près de la côte nord la nappe phréatique émerge par endroits dans les interdunes, formant les mares temporaires des "*Niayes*".

I-3-2 L'hydrologie océanique

I-3-2-1 Les courants de dérive

En ne considérant que les grands courants océaniques, le régime des courants côtiers devant le Sénégal est la résultante de deux systèmes aux caractéristiques très différentes (Rebert et Domain, 1977) :

- venant du nord, un courant froid, le courant des Canaries se déplace vers le sud tout le long de la côte sénégalaise. Il s'agit d'un courant de dérive quasi-permanent pendant toute la saison des alizés (décembre à avril) ;
- venant de l'ouest, un courant chaud, le contre-courant équatorial s'écoule vers l'est jusqu'à la côte d'Afrique où il devient le courant de Guinée. Ce courant se forme sous la structure EMV. En été, il atteint le sud du pays et s'écoule vers le sud-est en arrivant sur la côte ouest-africaine à la latitude de la Guinée.

I-3-2-2 Le régime hydrologique

Les masses d'eau transportées par les deux courants ont des caractéristiques bien distinctes. Les eaux du contre-courant équatorial ont une température élevée (27 à 28 °C) et des salinités fortes (36 ‰ environ). On les observe de juin à août sur les côtes sénégalaises. Les eaux de la dérive côtière des alizés sont froides (températures inférieures à 20 °C) et ont une salinité plus faible et variable (35,4 à 36 ‰). A partir du mois d'août et jusqu'en novembre apparaît en outre une catégorie d'eaux de surface chaudes et peu salées (salinité inférieure à 35 ‰) qui résultent d'un mélange avec les eaux de pluies de la mousson et surtout avec les apports fluviaux côtiers.

Le déplacement alternatif des agglutinations anticycloniques des Açores et de Sainte Hélène fait remonter l'ensemble du système de courants vers le nord en hivernage et le fait descendre vers le sud en saison sèche. Les eaux chaudes et froides de ces courants sont séparées par une zone frontale, où la température varie très rapidement sur de courtes distances.

Les eaux chaudes ont une température relativement constante d'une année à l'autre. Leur épaisseur varie entre 30 et 50 mètres, maximum observé au mois d'août. Les eaux froides ont par contre une température beaucoup plus variable d'une année à l'autre. Ce phénomène est également relié à l'upwelling côtier.

I-3-2-3 L'upwelling côtier

L'upwelling est la résultante d'une divergence horizontale dans la couche de surface qui entraîne un mouvement vertical de compensation dirigé vers le haut. Il a pour conséquence la remontée d'eaux froides qui crée une anomalie thermique à la surface de la mer.

Trois types d'upwelling peuvent se rencontrer : l'upwelling côtier, l'upwelling de pleine mer et l'upwelling équatorial. De ces trois, le plus important est assurément, en particulier par l'ampleur du mouvement vertical de compensation qui l'accompagne, l'upwelling côtier qui intéresse les façades occidentales des continents où les vents dominants entraînent l'eau de surface vers le large (Leroux, 1983). Le Sénégal se trouve dans cette situation pendant la saison des alizés, lorsque les vents soufflent des secteurs nord-ouest à nord-est.

Les conséquences climatiques du phénomène d'upwelling sur toute la bande côtière sont importantes. La fraîcheur de toute cette zone est notamment en rapport avec ce phénomène. Les

régions littorales lui doivent leurs caractères thermiques pondérés qui s'expriment par une faible amplitude, diurne autant qu'annuelle. Sous l'effet de l'upwelling, les rivages sénégalais même quand les influences continentales sont très fortes les effets de l'alizé continental sont atténués par la brise de mer.

I-4 CLIMAT

Les grands traits climatiques du Sénégal résultent de la combinaison des facteurs géographiques et aérologiques. Les premiers s'expriment par la latitude qui confère au territoire des caractères tropicaux, et par la position de finistère ouest-africain qui détermine des conditions climatiques différentes entre le littoral et l'intérieur du pays. Les secondes s'expriment par l'alternance sur le pays de trois flux dont les déplacements sont facilités par la monotonie du relief. L'ensemble du territoire appartient à la zone soudano-sahélienne. Le Sénégal est soumis à l'influence des circulations d'alizé et/ou de mousson issues des anticyclones boréal (Açores) et austral (Sainte-Hélène). La ligne de confluence de ces flux correspond à l'Equateur Météorologique qui connaît une migration saisonnière dans ses deux structures : l'Equateur Météorologique Incliné (EMI) et l'Equateur Météorologique Vertical (EMV) (Leroux, 1992). En été boréal, se succèdent du nord au sud : l'EMI (les pluies issues de cette structure, essentiellement orageuses sont associées aux lignes de grains), et l'EMV qui intéresse l'extrême sud du pays (12 à 13°N). C'est la zone des pluies denses, abondantes et peu orageuses.

Le critère pluviométrique divise l'année en deux saisons principales : une saison sèche qui dure 6 à 9 mois du sud au nord et une saison pluvieuse qui va généralement de mai à octobre. Les totaux pluviométriques annuels croissent du nord au sud du pays.

Les températures, en permanence élevées, sont liées à la latitude tropicale du Sénégal. Elles varient dans le temps, selon les saisons, notamment avec les pluies qui les abaissent, et dans l'espace avec la proximité ou l'éloignement de la mer. Les températures moyennes, permettent de distinguer au moins deux régions sur le plan climatique : une zone littorale large de quelques dizaines de kilomètres, aux conditions thermiques plus fraîches en saison sèche (influence océanique) et l'intérieur du pays caractérisé par sa continentalité présente des conditions thermiques plus contraignantes avec des températures moyennes élevées.

Il existe cinq domaines climatiques au Sénégal. La détermination de ces domaines climatiques est basée selon la classification génétique fondée sur les facteurs du climat (Leroux et Sagna, 2000).

- Le domaine de l'alizé maritime stable ne concerne que la Grande Côte du Sénégal. Les précipitations sont liées aux invasions polaires et aux remontées de la mousson. Sous l'influence océanique, les températures sont fraîches et les amplitudes thermiques. L'humidité est très forte ;
- Le domaine sahélien, compris entre les isohyètes 100 et 500 mm, est la partie la plus aride et la plus chaude du Sénégal. Les précipitations sont orageuses, violentes et irrégulières. Les contrastes saisonniers sont importants avec un été chaud et une période hivernale relativement fraîche, surtout les nuits ;
- Le domaine nord-soudanien enregistre des précipitations comprises entre 500 et 1000 mm et est balayé par l'alizé continental communément appelé harmattan pendant 4 à 5 mois. Les pluies y sont apportées pour plus de 80 % par les lignes de grains dont l'efficacité pluviométrique est plus grande que celle de la mousson. Les températures, élevées dans l'ensemble, sont atténuées en saison des pluies relativement importantes ;
- Le domaine sud-soudanien constitue une partie humide grâce à la présence du flux de mousson pendant plus de huit mois et grâce aux précipitations supérieures à 1000 mm par an. Dans cette

zone, les premières et dernières pluies sont pour l'essentiel apportées par les lignes de grains. L'importance des pluies estivales explique la baisse des températures au cœur de la saison pluvieuse et le caractère bimodal du régime thermique ;

- Le domaine soudanien atlantique est une variante littorale du domaine soudanien. Il concerne la franche côtière de la Petite Côte à la Casamance. La spécificité de cette zone réside dans l'alternance entre l'alizé maritime et la mousson contrairement à l'intérieur du pays où la mousson alterne avec l'harmattan. C'est une zone où certaines perturbations cycloniques trouvent les conditions favorables à l'évolution en dépression tropicale ou en cyclone. Les températures y sont modérées grâce à l'influence de l'Océan Atlantique.

I-5 VEGETATION ET FAUNE

I-5-1 La végétation

L'absence de reliefs importants et le développement limité du réseau hydrographique donnent aux facteurs climatiques un rôle prépondérant dans la répartition des paysages végétaux du Sénégal. Il en résulte une disposition zonale des grands domaines phytogéographiques interrompue par quelques formations azonales dans les vallées et le long de la côte. La croissance progressive des pluies du nord au sud se traduit par des transitions insensibles dans l'évolution des paysages. Trois principaux domaines phytogéographiques peuvent ainsi être distingués (Adam, 1966 ; Ndiaye, 2000) :

- le domaine sahélien est une zone caractérisée par la prédominance des acacias (*Acacia raddiana*, *Acacia senegal*...) et un tapis herbacé composé de graminées annuelles où domine le cram-cram (*Cenchrus biflorus*). La transition vers le sud est faite par des savanes arborées avec une présence notoire du kadd (*Acacia albida*) ;
- le domaine soudanien est par excellence la zone de la savane sous différentes physionomies. Les espèces végétales comme le caïlcédrot (*Khaya senegalensis*), le vèn (*Pterocarpus erinaceus*) et le néré (*Parkia biglobosa*) dominent dans cette zone. Des peuplements homogènes apparaissent dans les vallées. Ces peuplements sont composés pour l'essentiel de rôniers (*Borassus aethiopum*) et parfois des bambous (*Oxytenanthera abyssinica*). La transition avec le domaine subguinéen est marquée par l'apparition, en Moyenne-Casamance, d'essences préforestières comme le santan (*Daniellia oliveri*) et le tali (*Erythrophleum guineense*) ;
- le domaine subguinéen est limité à la Basse-Casamance. Il est caractérisé par la présence d'une forêt dense à feuilles caduques dominée la présence de *Parinari excelsa* et *Chlorophora regia* auxquels sont associés le palmier à huile (*Elaeis guineensis*).

A ces domaines, s'ajoutent les groupements azonaux localisés dans des milieux où règnent des conditions hydrologiques particulières. Il s'agit de la vallée inondable du Sénégal où existe une forêt de gonakiés (*Acacia nilotica*), des dépressions inter-dunaires ("*Niayes*") de la Grande Côte dominées par la présence d'*Elaeis guineensis* et des estuaires du Saloum et de la Casamance avec leurs peuplements de palétuviers (*Rhizophora racemosa*) qui forment un écosystème du littoral adapté à l'eau saumâtre communément appelé mangrove.

I-5-2 La faune

Le Sénégal regroupe bon nombre d'espèces animales composées essentiellement de reptiles, d'oiseaux et de mammifères (Ndiaye, 2000). Les reptiles sont composés pour l'essentiel de varans (*Varanus niloticus* et *Varanus exanthematicus*), de grands serpents (*Python sebae*) et de crocodiles qui ne subsistent que dans les vallées de la Gambie et de la Falémé. Il existe de nombreuses espèces

d'oiseaux au Sénégal parmi lesquelles on peut noter des oiseaux migrateurs tels que les canards, les oies, les flamants et les hirondelles qui viennent nicher dans les biotopes humides du Sénégal durant l'hiver boréal. Quant aux mammifères, ils constituent avec les oiseaux l'élément le plus intéressant de la faune sénégalaise et sont représentés par une centaine de genres. Les grands mammifères comme le lion, l'éléphant et les grandes antilopes sont en situation précaire dans le parc national du Niokolo Koba en raison des actions anthropiques comme la chasse, le braconnage et l'extension de l'occupation humaine.

CONCLUSION

Avec 700 km de côtes, le Sénégal est largement ouvert sur l'Océan Atlantique. Sa situation en latitude le place au cœur de la zone intertropicale tandis que sa situation en longitude explique son appellation de "finistère ouest-africain". C'est un pays composé, pour l'essentiel, de bas plateaux à l'exception des régions de Dakar et de Thiès, et le sud-est du pays où les accidents topographiques sont les plus caractéristiques. Au plan géologique, on retrouve à peu près la même opposition entre le sud-est (affleurement du socle précambrien) et la majeure partie du pays appartenant au grand bassin sédimentaire sénégal-mauritanien où se sont entassés les dépôts du Secondaire et du Tertiaire. Plus que tous les autres éléments du climat, ce sont les surtout les précipitations annuelles qui introduisent une différenciation notable et une disposition zonale des grands domaines phytogéographiques. Plusieurs bassins hydrographiques intéressent le Sénégal dont les plus importants sont le fleuve Sénégal, la Gambie et la Casamance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adam J. G., 1966. Les pâturages naturels et post-culturels du Sénégal. Bulletin de l'IFAN, série. A (2) : 450-537.

ENS, 1989 : Le Sénégal : Géographie physique, humaine, économique et études régionales. Classes terminales. EDICEF, 159 p.

Leroux M., 1983 : Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de doctorat d'Etat ès-Lettres, Dijon, 3 tomes, 1427p.

Leroux M., 1992 : L'équateur météorologique en Afrique tropicale. Du Front Intertropical (FIT) à l'Equateur Météorologique (EMI et EMV). Évolution d'un concept. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, vol. n°5, pp. 145-156.

Leroux M. – Sagna P., 2000 : Climat. In Atlas Jeune Afrique : le Sénégal. Paris : Editions Jeune Africain, pp.16-19.

Michel P. et Sall M., 2000 : Relief et sols. In Atlas Jeune Afrique : le Sénégal. Paris : Editions Jeune Africain, pp.8-11.

Michel P. et Sall M., 2000 : Géologie et hydrogéologie. In Atlas Jeune Afrique : le Sénégal. Paris : Editions Jeune Africain, pp.12-13.

Michel P. - Sall M. et Kane A., 2000 : Hydrologie. In Atlas Jeune Afrique : le Sénégal. Paris : Editions Jeune Africain, pp.14-15.

Ndiaye P., 2000 : Végétation et faune. In Atlas Jeune Afrique : le Sénégal. Paris : Editions Jeune Africain, pp.20-21.

Rebert J. P. et Domain F., 1977 : Hydrologie océanique. In Atlas National du Sénégal. Paris, pp 36-37.

SECTION 2 :

GROUPE THÉMATIQUES ET PROPOSITIONS D'ÉTUDES

II-1 RESEAU D'OBSERVATION DU SENEGAL

Contributions : Aïda Diongue Niang*, Mamadou Watt**, Oumar Sall***

* Division Recherche et Développement, Direction de la Météorologie Nationale

** Chef du Service Météorologique de l'ASECNA

*** Le présent document se base en partie sur le rapport d'inspection du Chef du Bureau Réseau de la Direction de la Météorologie Nationale, Oumar Sall

SOMMAIRE

La présente note fait le point sur le réseau d'observations météorologiques sénégalais. Elle contient des recommandations visant à améliorer et à moderniser la collecte et la transmission des données d'observations météorologiques. Le Sénégal a des acquis uniques en Afrique noire constitués d'un réseau vieux d'un siècle et demi et d'une série chronologique de données qui risque d'être interrompue si les mesures recommandées n'étaient pas prises.

II-1-1 LE RESEAU D'OBSERVATIONS METEOROLOGIGIQUES

Le réseau connaît une gestion bicéphale : la Direction de la Météorologie Nationale s'occupe de la Maintenance, du suivi des observations, de leur collecte et de leur transmission tandis que la gestion administrative et financière incombe au « Bureau Exploitation » des « Activités Aéronautiques Nationales » de l'ASECNA.

II-1-1-1 Réseau synoptique

Le réseau de surface sénégalais est composé de douze stations synoptiques (voir tableau 1). Ces stations fournissent des mesures instrumentales des conditions de surface (pression, température, humidité, vent, insolation, précipitations) et des observations visuelles (nuages, phénomènes météorologiques). Toutes les stations participent à l'échange régional de données et neuf d'entre elles (Saint-Louis, Dakar-Yoff, Tambacounda, Ziguinchor, Kaolack, Linguère, Matam, Podor, Kolda) participent à l'échange mondial. Ces stations synoptiques effectuent des mesures horaires à tri-

horaires qui sont transmises normalement toutes les trois heures via le Système Mondial de Transmission des données (SMT).

Pour des besoins aéronautiques, les cinq stations synoptiques se trouvant dans des aéroports (Dakar-Yoff, Saint-Louis, Tambacounda, Ziguinchor et Cap-Skiring) fournissent normalement des observations régulières horaires, voire semi-horaires, chiffrées et transmises sous une forme symbolique appropriée (METAR ou METeorological Airport Report) dans le cadre du programme SADIS (Système de DIStribution de données Aéronautiques).

Parmi les stations synoptiques, uniquement celle de Dakar-Yoff utilise une station automatisée d'observation en surface. Ainsi, la collecte, la vérification, la composition sous forme de messages, l'affichage et la transmission des données se font automatiquement.

II-1-1-2 Réseau d'altitude

Le réseau d'altitude actuel est composé de quatre(4) stations : Dakar-Yoff, Tambacounda, Ziguinchor et Saint-Louis. Deux de ces stations, Dakar-Yoff et Tambacounda, effectuent des sondages complets, Dakar-Yoff à 0000 TU et 1200 TU et Tambacounda à 1200 TU. Deux sondages, exclusivement pour le vent, sont effectués à 0600TU et 1800TU par les quatre stations.

II-1-1-3 Réseau climatologique

Le réseau climatologique est composé de huit stations (voir tableau 1) et fournit les mêmes observations que les stations synoptiques, à l'exception des données relatives à la pression atmosphérique. Les observations sont effectuées toutes les heures pendant la période diurne (de 0600 TU à 1200 TU). La plupart de ces stations participent au programme d'échanges de données climatiques de l'OMM.

II-1-1-4 Réseau agrométéorologique

Le réseau agrométéorologique exploité en association avec l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) compte six stations créées en faveur des projets du Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS). Ces stations fournissent les mêmes observations que les stations climatologiques, à la même fréquence. Actuellement, la station de Khombole est momentanément fermée pour des raisons logistiques.

II-1-1-1-5 Réseau pluviométrique

Le réseau pluviométrique est composé de 300 postes environ implantés au niveau des arrondissements et communautés rurales. Ces postes recueillent uniquement la hauteur des précipitations. Plusieurs de ces postes étaient fermées ou mal suivies mais durant l'année 2004, beaucoup de postes pluviométriques ont été rénovés et d'autres ouverts dans la partie nord-est qui est très déficitaire (voir carte du réseau en figure 1).

II-1-1-1-6 Stations de réception de données satellitaires

En ce qui concerne la surveillance du déplacement et du développement des systèmes convectifs de la Mousson Africaine, l'imagerie satellitaire est devenue indispensable, notamment pour la prévision. Les stations au sol qui reçoivent les renseignements numériques et analogiques émis par les satellites, les stations principales d'utilisation des données (PDUS en anglais), sont installées à la Direction de la Météorologie Nationale et au Service Météorologique de l'ASECNA. Il est heureux de constater que les stations PDUS de Meteosat Second Generation (MSG) seront installées avant la fin de l'année 2004 aussi bien à la Direction de la Météorologie Nationale qu'au Service Météorologique de l'ASECNA.

II-1-1-1-7 Stations Radar

Les observations météorologiques au radar permettent la localisation et le suivi des échos de précipitations, notamment ceux associés aux orages, aux cumulonimbus et aux tempêtes tropicales. Ces renseignements sont utilisés, d'une part de manière opérationnelle pour les besoins de la prévision à court terme, notamment aéronautique, et d'autre part, pour la recherche. Jusqu'en octobre 2004, seule la station de Dakar-Yoff était équipée en radar pluie (bande C (5 cm), non Doppler). Maintenant un radar météorologique Doppler, de bande S (10 cm), acquis par la DMN du Sénégal, a été installé à Linguère.

Le réseau est schématisé sur la figure 1 et les coordonnées des stations synoptiques, climatologiques et agrométéorologiques sont disponibles sur le tableau 2.

II-1-2 COLLECTE ET RETRANSMISSION DES DONNEES DE BASE

Le système de transmission météorologique sénégalais fonctionne suivant le principe suivant.

Toutes les données d'observations du Sénégal sont concentrées par le centre de transmission de Dakar à travers le système BLU, DCP/DRS et le Téléphone : les données d'observations de base sont compilées dans des bulletins destinés aux échanges régional et mondial conformément aux procédures de transmission en vigueur. Les observations synoptiques chiffrées sous les formes appropriées pour les stations terrestres sont effectuées à intervalles de trois (3) ou six (6) heures et diffusées dans le monde entier.

Toutes ces observations transitent sur le réseau de télécommunication spécialisé appelé « système mondial de télécommunication » ou « SMT », pour aboutir aux centres de calcul mondiaux. Ces informations sont ensuite assimilées dans les modèles de Prévision Numérique du Temps pour fournir des analyses.

II-1-2-1 Système BLU

Toutes les stations du réseau national sont équipées du système BLU. Cependant des dysfonctionnements sont notés suite aux problèmes de fréquences de nuit qui sont de moins en moins audibles, suite à la vétusté de ces équipements entre autres.

II-1-2-2 Système DCP/DRS

Le Centre Régional de Transmission (CRT) de Dakar a été équipé en 1989 d'un Système de Réception de Données (SRD ou DRS en anglais) couplé aux Plate-formes de Collecte de Données (PCD ou DCP en anglais) installées dans sa zone de responsabilité. Depuis sa mise en œuvre, cela a permis de recevoir les données issues des pays du Golfe de Guinée, Sainte-Hélène etc., requises pour l'exploitation.

Afin d'améliorer la réception à Dakar des bulletins d'observations en provenance des autres stations météorologiques nationales, le système DCP a été également installé au niveau de dix stations (Saint-Louis, Ziguinchor, Kolda, Podor, Kaolack, Tambacounda, Matam, Linguère, Ranérou, Kédougou).

Actuellement, le système DCP/DRS ne fonctionne pas. Cela est lié en partie au système d'horlogerie qui est vétuste. Il existe maintenant un système d'horlogerie équipé d'un GPS mais il n'est pas disponible dans la zone de responsabilité du CRT de Dakar.

II-1-2-3 Téléphone

Suite aux difficultés rencontrées dans la collecte des données météorologiques des stations de l'intérieur du pays, des crédits téléphoniques pour la collecte des données météorologiques pour le Centre Régional de Transmission ont été alloués par les « Activités Nationales » de l'ASECNA.

II-1-2-4 Tableau de disponibilité des données

Les taux de disponibilité mensuelle des données d'observations de base à la date du 31 décembre 2003 sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : taux de disponibilité mensuelle des données d'observations de base (31-12-2003)

MOIS	% DISPONIBILITE	MOIS	% DISPONIBILITE
JANVIER	91.8	JUILLET	56.6
FEVRIER	92.9	AOUT	91.2
MARS	78.3	SEPTEMBRE	96.2
AVRIL	80.2	OCTOBRE	94.2
MAI	72.5	NOVEMBRE	94.1
JUIN	56.8	DECEMBRE	94.2

Soit une disponibilité moyenne annuelle de 83.5 % représentant une hausse de 0.3 % par rapport à l'année 2002 (disponibilité moyenne = 83.2 %).

II-1-3 CRITIQUES DU RESEAU ET RECOMMANDATIONS

Le réseau souffre d'un problème de vétusté des équipements qui rend les éléments peu fiables et leur maintenance difficile, faute de pièces de rechange. Par ailleurs, la maintenance régulière des équipements et instruments de mesure n'est pas assurée, faute de pièces de rechange ou de moyens de déplacement dévolus aux techniciens formés à cet effet. Les chefs de stations implantées dans les capitales régionales ne disposent d'aucun moyen de déplacement pour assurer un encadrement de proximité des postes pluviométriques.

Le développement des agglomérations de Podor, Ziguinchor, Koalack, Kolda, Diourbel, Matam, Linguère, Thiès et Mbour fait que les parcs où sont installés les équipements de mesure sont

négalement influencés par des phénomènes parasites locaux. A coté de cela, certaines stations (Khombole, Guédé, Kounghoul, Ranérou, Nioro, Goudiry) ne disposent pas de locaux appropriés. On peut noter également l'inexistence des ressources financières pour assurer le fonctionnement des stations climatologiques créées à la faveur de projets du Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS) maintenant terminés.

Un autre problème est lié au retard dans l'informatisation des stations qui rend difficile le travail de collecte, de transmission et d'archivage.

On note également un manque de motivation des agents opérant au niveau des stations et postes climatologiques qui se sentent abandonnés à leur sort.

Pour une bonne amélioration des systèmes d'observation et de transmission météorologique, il faudrait :

- Procéder au renouvellement des équipements classiques d'observation des paramètres météorologiques dans toutes les stations de l'intérieur et au remplacement de tous les pluviomètres défectueux,
- Procéder au remplacement des systèmes BLU vétustes,
- Déplacer les stations ne suivant plus les normes météorologiques et construire des locaux pour des stations qui n'en disposent pas,
- Doter les stations de carnets météorologiques et de produits d'exploitation nécessaires pour la collecte et transmission de données,
- Envisager l'informatisation et l'automatisation de ces stations, leur connexion à Internet et au réseau d'électricité, d'eau et de téléphone,
- Doter de moyens nécessaires de suivi et d'inspection du réseau aux chefs de bureaux « Réseau » et « Maintenance »,
- Doter de véhicules aux chefs de stations opérant aux capitales régionales pour assurer un suivi de proximité,
- Assurer des formations de remise à niveau des observateurs aux nouveaux codes météorologiques,
- Assurer la formation du personnel des stations à l'informatique, aux techniques de maintenance du matériel électronique.

Tableau 2 : Coordonnées géographiques des stations de surface du Sénégal

Nom Stations	Latitude Stations	Longitude Stations
Stations synoptiques		
Podor	16.65 N	14.93 W
Saint-Louis	16.05	16.45
Matam	15.63	13.25
Linguère	15.38	15.12
Dakar	14.73	17.50
Diourbel	14.65	16.23
Kaolack	14.13	16.07
Tambacounda	13,77	13.68
Kolda	12.88	14.97
Kédougou	12.57	12.22
Ziguinchor	12.55	16.27
Cap-Skiring	12.40	16.75
Stations climatologiques		
Ranérou	15.30	13.97
Bakel	14.90	12.47
Thiès	14.80	16.95
Mbour	14.42	16.97
Fatick	14.33	16.40
Goudiry	14.18	12.72
Koungheul	13.58	14.50
Simenti	13.05	13.30
Stations agrométéorologiques		
Guédé	16.33	14.45
Louga	15.62	16.22
Bambey	14.70	16.46
Khombole	14.46	16.42
Nioro	13.73	15.78
Vélingra-Casa	13.15	14.10

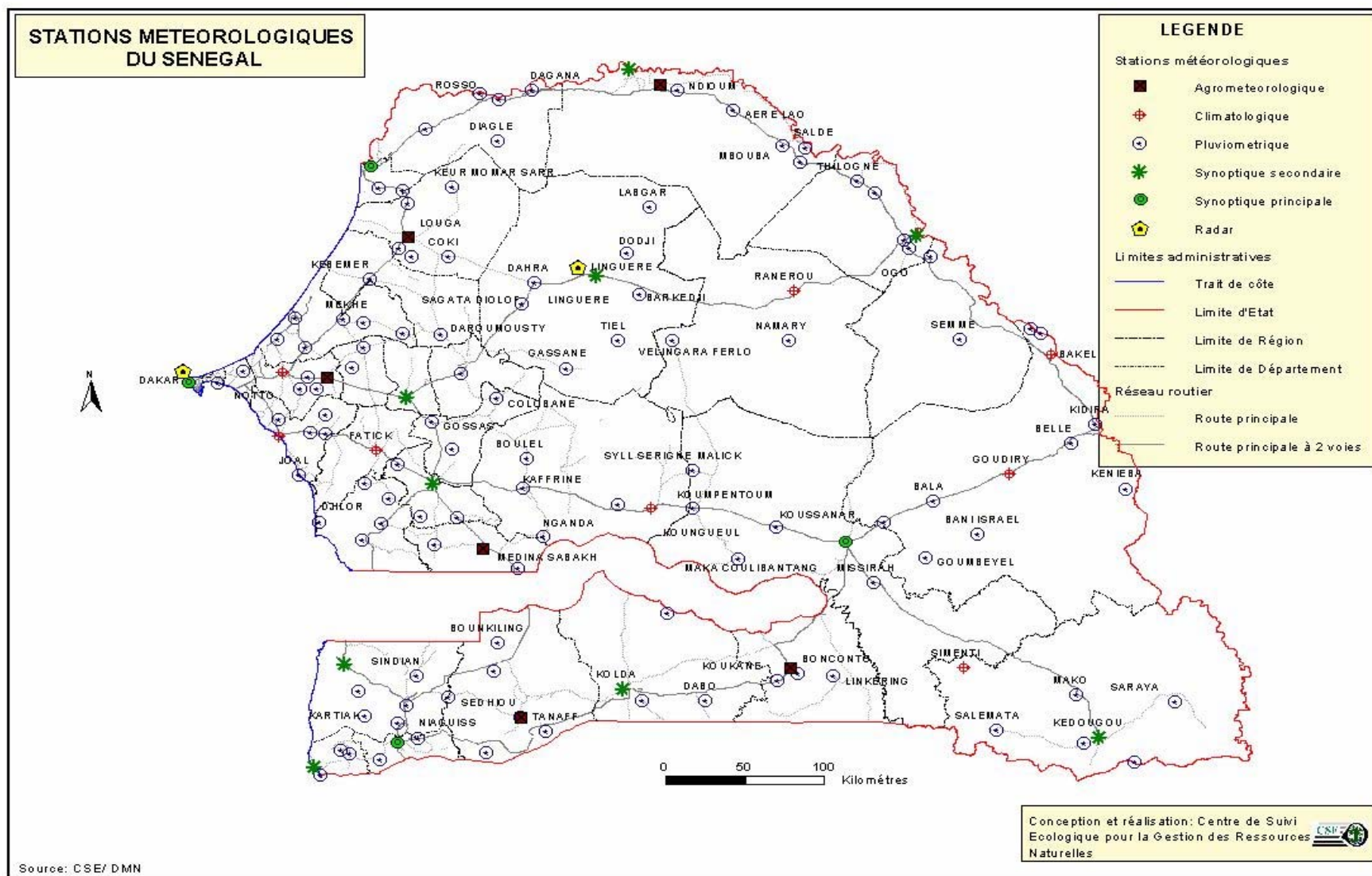


Figure 1: Carte du réseau météorologique national. La station agrométéorologique de Khombole momentanément fermée n'est pas incluse, aussi bien que des postes pluviométriques récemment créées

II-2 ESTIMATION DES PLUIES PAR RADAR ET SATELLITE

Chercheurs impliqués:

Dr Cheikh Mouhamed Fadel KEBE, LPASF/UCAD (coordonnateur)

Dr Daouda Badiane, LPASF/UCAD

Dr Marianne Diop, DMN

Dr Mbaye Diop, LERG

Dr Armand Nzeukou, Université Dschang, Cameroun

Mr Samo Diatta, LPASF/UCAD

DMN : Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal

LPASF : Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang

UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Introduction

La connaissance de la répartition des précipitations est utile en raison de son importance pour les activités humaines. De leur répartition spatio-temporelle va dépendre les rendements agricoles, notamment en zone sahélienne, où l'économie de certains pays est fortement tributaire de l'agropastoralisme. Il s'y ajoute des problèmes de santé publique relevant du développement des maladies comme les arboviroses et le paludisme dont l'épidémiologie est liée aux questions d'environnement et particulièrement à la mise en eau des gîtes larvaires des vecteurs intervenant dans le cycle de ces maladies.

La pluie est parmi, les paramètres atmosphériques, un des plus difficiles à analyser à cause de sa grande variabilité spatio-temporelle. Sa connaissance sur de grandes étendues est encore une information déficiente. En effet la représentativité d'une mesure pluviométrique (ponctuelle) varie en fonction du type d'événement, mais aussi de la position du point de mesure sur la surface considérée.

Cependant d'autres instruments basés sur la télédétection passive et active, tels que les radiomètres et les radars météorologiques, peuvent être utilisés dans l'estimation des précipitations. En effet, ils permettent une couverture spatiale régulière avec une bonne résolution spatio-temporelle (e.g. Barret et Martin, Atlas, 1990 ; Sauvageot, 1992). Toutefois ces estimations comportent des erreurs et biais provenant de la nature indirecte des relations entre l'observation (luminance pour les radiomètres, réflectivité pour le radar) et la précipitation. L'étalonnage est ainsi une étape nécessaire pour la validation des mesures.

Depuis l'avènement des satellites, plusieurs techniques d'estimation des pluies par satellite ont été développées (Wilheit, 1996 ; Kidder and Vonder Haar, 1995 ; Levizzani, 2000). La plupart des algorithmes utilisent le canal micro-onde et/ou infrarouge thermique. Au début, les applications étaient climatologiques de sorte que les estimations mensuelles, saisonnières ou annuelles étaient suffisantes. A cette échelle temporelle et spatiale les estimations satellitaires de pluies sont de bonne qualité. La qualité se dégrade dès qu'on passe à une estimation journalière, de quelques heures, ou une estimation liée à un événement pluvieux. Cette échelle est nécessaire pour la prévision de débits fluviaux ou la validation de simulation numérique de systèmes convectifs.

Les avancées récentes dans le domaine de la télédétection spatiale des précipitations offrent des possibilités d'accéder à la pluviométrie en Afrique de l'ouest pour une utilisation opérationnelle en temps quasi réel. Cependant ces estimations nécessitent d'être validées. L'expérience AMMA offre la possibilité d'une telle validation au Sénégal et dans l'ouest Africain. La contribution du groupe d'estimation des pluies par radar et satellite s'inscrit dans ce cadre.

II-2-1 OBJECTIFS GENERAUX

Il s'agit de mettre au point et de valider différents algorithmes d'estimation des pluies par télédétection active et passive au Sénégal et dans la région ouest Africaine. Ceci inclut les aspects collecte de données disdrométriques, de données radars (radar Band C et Band S), l'étalonnage de celles ci et leur gestion pour la restitution des champs de précipitations à différentes échelles spatio-temporelles. Les données rétrospectives de Météosat7 et celle de Meteosat Second Generation (MSG) seront mises en contribution pour les méthodes d'estimation des pluies par satellite. Ce type de données est plus adapté aux systèmes précipitants d'Afrique de l'ouest du fait de leur très bon échantillonnage spatio-temporelle bien que le lien avec la pluie soit indirect. Les données micro-ondes sont utilisées pour des validations ponctuelles sur des cas d'étude ou pour le développement de certaines techniques d'apprentissage des données IR (Jobard and Desbois, 1994).

II-2-2 OBJECTIFS SPECIFIQUES

Les objectifs assignés à ce projet sont les suivants :

- Etude la distribution granulométrique des gouttes de pluies en mer et dans la région du Fouta Djallon

- Réalisation d'un outil de traitement des données radar et disdrométriques
- Etablir les coefficients d'étalonnage des données radars à des fins de mesures quantitatives de précipitation
- Mise au point et validation de divers algorithmes d'estimation des pluies par télédétection
- Validation de sorties de modèles pour l'estimation et la prévision de la pluie
- Analyse des propriétés fractales des cellules convectives à différentes échelles spatiales
- Caractérisation des profils verticaux de pluie par les données TRMM

II-2-3 METHODOLOGIE ET DONNEES UTILISEES

Les divers projets de recherches décrites ici s'articulent autour de la mise au point et de la validation d'algorithme d'estimation des pluies par télédétection ainsi que de la validation des estimations et de prévisions de pluies à partir de modèles meso-échelles. Les méthodologies d'études sont présentées dans les différents projets.

Les sites d'étude ainsi que les données utilisés dans cette thématique sont présentés dans les tableaux généraux du programme AMMA-Senegal (voir thématique estimation des pluies).

II-2-4 PROJETS DE RECHERCHE

Les questions scientifiques traitées dans cette thématique sont exposées ci dessous. La plupart font intervenir soit les données radar et ou les données satellitaires dans le canal infrarouge ou micro-onde soit une combinaison des deux avec une vérité au sol pour l'étalonnage des données.

II-2-4-1 Etude de la distribution granulométrique des gouttes de pluies en mer et dans la région du Fouta Djallon : Application à l'étalonnage de données radars dans la zone ouest africaine

L'exploitation quantitative des données radar pour la mesure des précipitations n'est faite que lorsque ces données brutes sont étalonnées, notamment avec les observations *in situ*. Ces précipitations réellement mesurées au sol sont obtenues à l'aide de capteurs, placés au dessus du sol, tels que les pluviomètres, les pluviographes enregistreurs et intégrateurs et les disdromètres.

La plupart de ces méthodes d'étalonnage sont basées sur la détermination des coefficients permettant de relier le facteur de réflectivité radar Z à l'intensité de pluie R (Marshall et Palmer, 1948).

On utilisera dans ce projet la méthode climato statistique de Calheiros et Zawadzki (1987). Elle repose sur la constatation que la distribution de probabilité de l'intensité des précipitations $P(R)$ dans une région donnée, climatiquement homogène, est une fonction bien définie qui peut être déterminée avec un échantillon d'observation limité.

Dans les zones d'étude ciblées, la distribution de $P(R)$ est calculée à l'aide de mesures effectuées avec un disdromètre de type Joss Waldvogel (1967). Les distributions des gouttes de pluie sont intégrées sur un pas d'échantillonnage de 1 minute. Il s'agit ensuite de calculer la distribution de probabilité de Z , soit $P(Z)$, à l'aide de panoramiques radar représentatives constituant un échantillon statistiquement valable.

Une fois les deux distributions calculées, la méthode d'ajustement climatique consiste à remarquer que la distribution $P(Z)$ observée à l'altitude Z doit correspondre à la distribution $P(R)$ déterminée à l'aide de mesures au sol non biaisées et que la correction peut être obtenue par comparaison des deux distributions.

Pour obtenir les coefficients a et b de la relation Z - R permettant de convertir Z en R , il suffit de régresser les valeurs de $\log(R_i)$ et $\log(Z_i)$ correspondant à des seuils de probabilité i égaux. Ces valeurs sont calculées en intégrant les distributions de probabilité de R et de Z entre 0 et R_i ou Z_i , respectivement, de façon à ce que les intégrales soient égales.

Dans cette étude, il est prévu de compléter le réseau de disdromètres existant dans la zone ouest africaine pour d'une part étudier la distribution granulométrique des gouttes de pluie et d'autre part étalonner les données radar existant dans ces zones par la méthode climato statistique citée ci dessus. Les sites d'intérêt sont la région du Fouta Djallon et les îles du Cap vert pour l'accès à la distribution granulométrique des gouttes de pluies en mer. L'accès à la granulométrie des gouttes de pluie dans cette zone océanique présente un intérêt scientifique réel pour les études concernant la genèse africaine des cyclones.

Pour une meilleure coordination et optimisation de ce projet de recherche, le développement d'un logiciel de traitement unifié des données radar et disdrométriques est nécessaire. Ce logiciel prendrait en charge les aspects gestion des données sous forme d'une base structurée, l'étalonnage de celles-ci et la restitution de champs de pluies pour des besoins de suivi opérationnel.

II-2-4-2 Validation de la méthode des aires intégrales au Sénégal et dans l'ouest africain

La méthode des aires intégrales est utilisée pour étudier les précipitations et le potentiel hydrique des lignes de grains au Sénégal (perturbations d'est en ouest responsables de la majeure partie des pluies en zone sahélienne). Cette méthode repose sur l'existence d'une forte corrélation entre l'intensité de pluie générée par l'activité des cellules convectives pendant un temps T et l'aire occupée par ces cellules (Byers, 1948 ; Chiu, 1988; Lopez et al,1989; Atlas et al,1990; Sauvageot, 1994, Ramos buarque, 1997).

Soit $A(\tau)$ l'aire occupée par les cellules de pluie correspondant aux intensités supérieures, soit $R > \tau$ et soit A_r la surface instantanée de pluie (c'est à dire l'aire pour laquelle $R > 0$). Supposons que $\langle R \rangle$ représente la moyenne du taux de pluie sur la surface A_r . Pour une observation à un instant t , le rapport $F(\tau) = A(\tau)/A_r$ appelé aire fractionnelle est lié à $\langle R \rangle$ par la relation (Atlas et al,1990):

$$\langle R \rangle = S(\tau) F(\tau)$$

Le facteur de proportionnalité $S(\tau)$ ne dépend que du seuil de pluie τ et du contexte climatique. Par conséquent, pour une zone d'étude bien définie, si $S(\tau)$ est connu, la mesure de l'aire fractionnelle permet de calculer $\langle R \rangle$.

Dans la première phase de l'application de cette méthode, les valeurs de $S(\tau)$ en zone côtière au Sénégal ont été déterminées pour la validation des mesures radar comme référence de la pluie au sol. Il s'agit d'étendre cette étude dans d'autres zones dans l'ouest Africain de régime climatique différent particulièrement en basse côte de climat humide et dans le climat continental sahélien. Cette méthode sera ensuite appliquée aux images infrarouges de Météosat dans les zones d'observations du radar. On cherchera la corrélation entre l'intensité de pluie (radar) et l'aire fractionnelle satellitaire, seuillée à différentes valeurs de températures de brillance, dans le but de calibrer les aires infrarouges Météosat par les aires radar pour l'estimation des pluies par satellite. Le résultat attendu est la validation de la méthode d'estimation des pluies par radar et satellite par les aires intégrales et les aires fractionnelles dans toute la région ouest africaine.

II-2-4-3 Estimation des pluies à petites échelles de temps et d'espace à partir des données satellitaires dans l'infrarouge thermique

Dans les travaux antérieurs effectués par Kebe (sous presse), la méthode des aires fractionnelles (ou méthode à seuil ou méthode GPI - pour GOES Precipitation Index) appliquée aux données radar et spatiales du Sénégal est analysée. On montre en particulier que la valeur du coefficient linéaire $G(\tau_{TB})$ reliant l'aire IR dont l'EBBT (Equivalent Black Body Température) est inférieure à un seuil et le volume de pluie dans l'aire d'observation est homogène sur le Sénégal et sa région côtière. La valeur de ce coefficient a pu être déterminé avec une bonne précision grâce aux données du radar de Dakar - Yoff utilisées, après étalonnage, comme données de pluie au sol.

L'idée est d'étalonner le coefficient $G(\tau_{TB})$ dans la région où les données radar sont disponibles puis de tenter d'étendre et de généraliser les résultats dans le but d'estimer la pluie avec les seules données Météosat dans les régions du Sénégal non vues par le radar. L'étude proposée consiste à développer cette idée. Son intérêt est double. Il est d'abord de valider une méthode d'estimation des pluies pour l'ensemble du Sénégal et de sa région côtière et d'en déterminer les limites en terme de précision. Il est ensuite de faire avancer la connaissance des méthodes à seuil en explorant leurs potentialités pour les petites échelles d'espace, ce qui est identifié comme une voie de recherche très intéressante par la communauté spécialisée. Cette étude sera étendue dans toute la région ouest africaine.

II-2-4-4 Validation de la méthode EPSAT pour l'estimation des pluies à de petites échelles temporelles

L'estimation des pluies faite au Laboratoire de Recherches en Géomatique (LERG) est une activité fondée sur les acquis de l'ex- UTIS et a trait à la climatologie satellitaire, avec une expertise vieille de plus de 10 ans (Cadet et al., 1991). Les recherches menées au Sénégal pour la restitution des champs pluviométriques ont permis d'identifier des indicateurs satellitaires et de mettre au point une méthode de suivi en temps quasi réel de la pluie (Lagouarde, 1986 ; Nègre, 1987 ; Diagne et Pesin, 1992). Le modèle utilisé repose sur une régression linéaire multiple avec deux indicateurs: la température maximale au sol et l'occurrence de nuages à sommet froid (inférieure ou égale – 40 °C) :

$$P(\text{mm}) = a * \text{Occ} + b T_{\text{max}} + c$$

Ce modèle permet de faire un suivi de la pluviométrie à l'échelle décadaire, mensuelle et saisonnière. De bons résultats sont obtenus à l'échelle mensuelle et saisonnière, et la comparaison avec les pluies mesurées le montre bien (Diagne et Pesin, 1992). En revanche, les coefficients de la régression sont très variables d'une décade à une autre, ce qui se traduit souvent par des écarts entre pluies estimées et pluies mesurées.

L'amélioration de la méthode est donc nécessaire dans l'optique d'une meilleure utilisation de la climatologie satellitaire pour des applications agricoles. Cette amélioration pourrait se faire à travers ces axes de recherche suivants:

- l'identification d'indicateurs supplémentaires pour améliorer la qualité des pluies estimées ;
- le couplage de données satellitaires et radar afin de prendre en compte des phénomènes locaux qui influencent la pluie ;
- L'utilisation d'un autre modèle statistique.

II-2-4-5 Validation de la méthode TAMSAT au Sénégal et dans l'ouest Africain

L'intérêt du micro-onde pour l'estimation des pluies journalière par satellite sur le continent africain n'est pas évident à cause de la dépendance de l'émissivité de la végétation et de la teneur en eau des sols. En Afrique, le choix sera donc porté sur les données infrarouges. Les méthodes utilisées sont basées sur le seuillage des températures de brillance. L'estimation décadaire des pluies à partir des nuages à sommets froids (CCD) est faite manière opérationnelle par TAMSAT à l'Université de Reading depuis une vingtaine d'années. Certains pays africains et la FAO l'utilisent pour le suivi de l'hivernage, l'estimation des rendements, le développement des criquets et autres déprédateurs. La méthode d'EPSAT-Lannion, basée sur le CCD, la température de surface maximale et la latitude, est aussi bien connue. Arnaud et al. (1996) et Laurent (1996) ont montré sa supériorité sur celle de TAMSAT. Cependant la méthode de TAMSAT a l'avantage d'être calibrée avec les données historiques des pluviomètres alors que celle de EPSAT-Lannion utilise les données contemporaines. Pour certaines applications nécessitant une plus grande résolution temporelle, la disponibilité des données actuelles peut poser problème. Une nouvelle méthode basée sur celle de TAMSAT et intégrant les ondes d'est et les types de systèmes convectifs a été développée (Diop, 1998, Diop et Grimes, 2003). Elle a été calibrée et testée au niveau du bassin hydrologique de Oualia (85000 km²) pour des besoins d'estimation et de prévision de débit fluvial. Vu la quantité de données qui seront

collectées durant l'expérience sur la mousson africaine (AMMA), ce sera l'occasion de calibrer et tester cette méthode sur toute la sous-région sahélienne pour diverses applications.

II-2-4-6 Analyse des propriétés structurelles des cellules convectives par approche fractale et multifractale

Les données de télédétection étalonnées sont utilisées pour l'analyse des propriétés fractales des systèmes des cellules convectives observées à mésoéchelle (observations Radar) et à grande échelle (observations avec le satellite météo 7 et MSG). L'objectif est de comprendre la variabilité des caractéristiques structurelles des convections locale et profonde afin de suivre le cycle vie des nuages liés à ces types de convection. Les résultats de cette étude peuvent être mis en contribution pour l'amélioration de certaines techniques d'estimation des pluies dans l'infrarouge thermique. En effet, la détermination du cycle de vie des nuages permet de distinguer les phases de croissance donc fortement pluvieuses, de la phase de dissipation du système produisant de faibles pluies.

II-2-4 -7 Validation des sorties de modèle pour l'estimation et la prévision de la pluie

En zone sahélienne, les précipitations proviennent des lignes de grains et sont associées à l'avancée de la mousson. Ce sont essentiellement des précipitations convectives, avec une répartition très hétérogène au sol. Estimer la prévision des précipitations (à échéance de quelques jours) à méso-échelle constituerait une aide précieuse pour diverses applications. Ces estimations ont besoin d'être validées par les mesures observées. Les mesures radar effectuées en routine à Dakar permettront de calibrer le modèle météorologique. Il s'agira de valider les estimations et les prévisions de pluies obtenues à partir des divers modèles par les champs de pluies déduits des données radar.

II-2-4-8 Utilisation de données radar dans un modèle conceptuel de prévision de la pluie dédié à l'hydrologie urbaine et à l'étude de la dynamique des mares temporaires.

Les responsables de services hydrologiques opérationnels (annonce des crues, gestion de réseaux d'assainissement) voient leur tâche facilitée par une mesure des précipitations en temps réel et si possible une prévision de la pluie à une échéance voisine d'une heure.

Le radar météorologique à auscultation volumique, par sa résolution spatiale et temporelle fine (une image sur un domaine de quelques milliers de km² toutes les 5 à 15 minutes) est susceptible de satisfaire ces besoins. Il fournit des informations sur l'intensité de pluie, le contenu en eau et le déplacement des champs pluvieux. L'un des objectifs de cette étude est de savoir quels paramètres d'un tel radar peuvent être utiles et surtout comment incorporer ces données dans un modèle de prévision de la pluie à très courte échéance. Cette thématique de recherche pourra être mise en contribution pour l'étude de la dynamique des mares temporaires du Ferlo pour les applications environnement santé en particulier l'étude de l'épidémiologie de la fièvre de la vallée du Rift.

II-2-4 -9 Etude statistique des profils verticaux de pluie par le radar spatial de TRMM

La pluie dans les tropiques est un des paramètres les plus importants et la moins connue. Elle affecte le système du climat global. La chaleur latente associée à cette pluie joue un rôle important dans la circulation globale de l'atmosphère et le bilan radiatif de la terre.

Les mesures précises des variations spatiales et temporelles des pluies tropicales restent très difficiles à réaliser à la surface, ainsi une mesure d'une meilleure précision n'est possible qu'avec des instruments en orbite.

Dans le cadre de la préparation de l'expérience internationale AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) des travaux sont nécessaires pour améliorer les algorithmes de restitution de la pluie sur le continent à partir des observations spatiales. Cette amélioration passe par une meilleure compréhension des relations entre la physique des lignes de grains (plus gros pourvoyeurs de pluie au Sahel) et leur microphysique.

Le projet proposé ici consiste à effectuer une étude systématique des caractéristiques des profils verticaux de pluie associés aux systèmes précipitants observés en Afrique de l'Ouest. Une combinaison du radar spatial de TRMM (précipitation radar) avec une fréquence de 13.8 Ghz et des images de Météosat sera utilisée. Ce radar nous fournira les profils de pluie verticaux avec au maximum une occurrence par jour. Ces profils sont classifiés en stratiforme et convectifs en se fondant sur la présence ou l'absence de bande de brillance (isotherme 0°C). A la fréquence utilisée par le radar, le signal est atténué par les fortes précipitations mais cet effet est corrigé dans les algorithmes standards de traitement et l'on dispose du profil de réflectivité effectif, corrigé également

de l'effet de la bande brillante. Les images Météosat seront utilisées pour quantifier plus précisément le stade d'évolution et les caractéristiques des systèmes observés: croissance, vitesse de déplacement, durée de vie etc....L'acquisition de toutes ces informations sera la base de la recherche de paramètres qui peuvent être pertinents pour inférer des quantités probables ou possibles d'évaporations pour une mesure donnée. De plus des statistiques par régions et par saisons seront conduites car la nature même des mécanismes mis en jeu pour la formation des systèmes précipitants va être différente. Enfin, ces résultats seront vérifiés, dans la mesure où les données seront disponibles (difficultés d'avoir des mesures simultanées sol/espace), à l'aide de mesures de radar sol complétées par des informations de disdromètre pour améliorer la paramétrisation des relations réflectivité/taux de pluie du radar spatial.

II-2-5 RESULTATS ATTENDUS

La validation des ces divers algorithmes d'estimation des pluies par télédétection active et passive ainsi que la validation des sorties de modèles méso-échelle devraient conduire aux résultats suivants :

- Estimation des pluies par radar et satellite par les aires intégrales pour les besoins de suivi opérationnel
- Estimation des pluies par satellite à des faibles échelles spatio-temporelles pour diverses applications
- Validation des sorties de modèles méso-échelle pour l'estimation et la prévision de la pluie pour diverses applications
- Caractérisation de la granulométrie des gouttes de pluies en mer et dans le Fouta Djallon
- Caractérisation des propriétés structurales des cellules nuageuses par analyse fractale à partir des données radar et satellitaires
- Caractérisation des profils verticaux de pluies par télédétection spatiale

II-2-6 RESSOURCES ET COMPETENCES DANS LE DOMAINE DE L'ESTIMATION DES PLUIES

Un dispositif expérimental pour l'estimation des pluies par télédétection existe au Sénégal depuis plus de 15 ans à travers le projet Estimation des pluies par satellite (EPSAT) au Sénégal. L'ASECNA dispose aussi d'un radar opérant en band C numérisé par le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang (LPASF) en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. La Direction de la météorologie nationale s'occupe du réseau national de

pluviographes et le futur radar opérant en bande S qui sera installé dans le Ferlo pour l'opération pluies provoquées.

Depuis quelques années, les compétences liées à la thématique d'estimation des pluies par télédétection radar sont développées au Sénégal. La collecte et le traitement des données radar, disdrométriques et pluviométriques sont maîtrisés. Ceci a abouti à la soutenance de plusieurs thèses et mémoires de fin d'étude ainsi que des publications dans des revues à comité de lecture (voir annexe).

Ceci est valable dans le domaine de l'estimation des pluies par satellite. La méthode EPSAT est implantée depuis un certain nombre d'années à l'Unité de traitement d'images satellitaires (UTIS) devenu maintenant LERG pour l'estimation en temps quasi réel de la pluie pour des besoins agricoles.

- Traitement des données radar et disdrométriques : Dr Fadel KEBE (LPASF) et Dr Armand Nzeukou (UIT Fosto Victor, Cameroun)
- Traitement des données satellitaires : Dr Marianne Diop (DMN), Dr Mbaye Diop (LERG), Samo Diatta (LPA-SF)
- Analyse fractale : Dr Daouda Badiane

Le LERG dispose d'un personnel technique expérimenté dans le traitement des données satellitaires.

Il s'y ajoute des étudiants qui seront encadrés dans les différentes structures impliquées dans cette thématique. Ces étudiants seront mis à contribution dans la réalisation de ces différents projets.

II-2-7 CHRONOGRAMME

Phase 1: EOP (2005)

- Instrumentation des sites du Cap Vert et du Fouta Djallon pour les mesures disdrométriques
- Ateliers de formation sur la collecte des données radar et disdrométriques
- Formation sur la collecte et le traitement des données radars de band S
- Campagnes de mesures disdrométriques pendant l'hivernage
- Campagnes de mesure radar (Radar de Dakar Yoff et radar de Linguère)

- Création de la base de données pour l'archivage des données radar, disdrométriques et pluviométriques et satellitaires

Phase 2 : SOP1, SOP2 et SOP3 (2006)

- Campagne de mesure disdrométriques, pluviométriques et radar
- Recueil et mise en forme de données satellitaires
- Rapport sur les campagnes et de mesure et l'état de la base de donnée
- Participation à des conférences AMMA

Phase 3: 2007 et 2008

- Mise en forme des données et élaboration d'algorithme
- Traitement et analyse des données
- Travaux de publication et rédaction d'articles
- Participation à des conférences AMMA

II-2-8 COLLABORATIONS

En Afrique

- UIT Fosto Victor, Université Dschang, Cameroun
- Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF) de l'Université de Cocody , Abidjan, Côte d'Ivoire

En Europe

- Laboratoire d'Aérodynamique, Université Paul Sabatier de Toulouse (UPS)
- Laboratoire de Météorologie Physique (LAMP), Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand
- Laboratoire Central des ponts et chaussées, Nantes
- Météo France
- Université de Reading

II-2-9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Atlas, D., Rossenfeld, D. and Wolff, D., 1990: The estimation of convective rainfall by area integrals: The theoretical and empirical basis. J. Geophys. Res., 95 (D3): pp 2153-2160.

Barett and Martin, 1981: The satellite data in rainfall monitoring. Academic Press, 340 PP.

Calheiros, R. V., and I. Zawadzki, 1987: Reflectivity rain rate relationship for radar hydrology in Brazil. *J. Clim. and Appl. Meteor.*, 29, pp 1120-1135.

Chiu, L.S., 1988: Rain estimation from satellites: areal rainfall-rain relation. 3rd Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Amer. Meteor. Soc., Hampton, 361-367.

Diagne M et Pesin A, 1992 : Suivi de la pluviométrie par télédétection spatiale. La saison des pluies 1991 au Sénégal. EPSAT, Bulletin d'information, juillet. Pp3-9

Diop, M. and D.I.F. Grimes, 2003: Satellite-based rainfall estimation for river flow forecasting in Africa. II: African easterly waves, convection and rainfall. *Hydrological Sciences*: **48**, 585-599.

Diop, M., D.I.F. Grimes and G. Dugdale, 2000: African easterly waves and convection; in WMO TMRP No 63, pp 67-71.

Kébé, C. M. F., 2001: Estimation de l'intensité moyenne de la pluie dans les lignes de grains sahéliennes par une méthode d'aire intégrale appliquée aux données de télédétection radar et satellitaire, thèse de 3^{ème} cycle de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar , 147 pp.

Kidder S. Q and T.H Von der Haar, 1995: Satellite Meteorology: An Introduction. Academic Press, pp. 340. Data User's conference, Bologna, 29 May-2 June 2000. 344-353

Levizzani V., 2000: Satellite Rainfall Estimates: A look Back and a perspective. EUMETSAT Meteorological Satellite

Lopez, 1976: Radar characteristics of the cloud populations of tropical disturbances in the northwest Atlantic. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 268-283.

Marshall, J. S, and W. M. K . Palmer, 1948 : The distribution of rain drops with size. *J.Meteor.*, 5, pp195-166.

Nègre T, Imbernon J, Guinot J P, Seguin B, Berges J C, Guillot B, 1988 : Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par satellite Météosat. *L'agronomie Tropicale*, 43-4, 279-288.

Ramos Buarque, S., and H. Sauvageot, 1997: The estimation of rainfall in the Sahelian squall line by the area-threshold method. *Atmos. Res.*, 43, 207-216.

Sauvageot H.,1994: The probability density function of rain rate and the estimation of area integrals. *J. Appl. Meteor.*,33,1255-1262.

Sauvageot, H., 1992: Radar Meteorology, Artech House, 366 p.

Wilheit T. T., 1986 : Some comments on passive Microwave Measurement of Rain. *Bull. Ame. Meteor.Soc.*, vol 67, N°10, 1226-1232

1- Annexe (mémoires et articles publiés dans le domaine)

Diop, M. S, 1994: Etude par radar des systèmes convectifs sur le littoral Sénégalais en été 1993. Thèse de l'Université de Dakar, E.S.P. 103 PP.

Diop M., 2003 : Suivi agroclimatique de la saison des pluies 2003 au Sénégal ; Poster présenté lors de la conférence internationale Africa-GIS, tenue à Dakar du 4 au 8 novembre 2003.

Diop, M., 1998: The influence of weather systems on satellite rainfall estimation with application to river flow modelling. PhD thesis, University of Reading, 225pp.

Diop, M., Dugdale, G. and Grimes, D.I.F., 1996; The influence of easterly waves on satellite rainfall calibration on a Sahelian catchment; presented at the 2nd African Meteorological Society Conference, Morocco, 1996.

Kébé F., A. Nzeukou, M. Rakoto ET H. Sauvageot, 2002: Estimation de l'intensité moyenne de la pluie dans les lignes de grains, au Sénégal, par une méthode d'aire intégrale appliquée aux données de télédétection radar. Publication de l'Association Internationale de climatologie, vol 14, pp 379-386.

Nzeukou A., H. Sauvageot, D. ochou et F. Kebe, 2002: Distribution of rainfall parameters in the coast of CapVerde, J. Appl., Meteor.,vol 43., pages 90-105 .

Nzeukou A., and H. Sauvageot, 2002: Distribution of rainfall parameters near the coast of France and Senegal, J. Appl. Meteor.,vol.41, N°1, pages 69-82.

Nzeukou A., 2002: Variabilité spatiale à moyenne échelle des conditions de propagation des micro-ondes dans les précipitations, thèse d'université Paul Sabatier de Toulouse, 133 pages

Nzeukou, A, H. Sauvageot, F. Kébé, D. Badiane et S. M. Sall, 2002: Egordicité des champs de pluie sur la côte sénégalaise, Publications de l'Association Internationale de climatologie, vol 15.

II-2-10 BUDGET

Besoins	coûts
Equipements + Consommables	
➤ 2 disdromètres + configuration	30 000 000 FCFA
➤ 2 stations automatiques	6 000 000 FCFA
➤ 4ordinateurs +4 imprimantes.....	5 400 000 FCFA
➤ Extra disque 9 Gbytes	466 000 FCFA
➤ 1 Licence IDL	1 825 000 FCFA
➤ 3 Compilateurs Fortran	1 551 000 FCFA
➤ Consommables (CD, Papiers, Transparents et cartouches ...).....	2 500 000 FCFA
<u>Voyages (formations, conférences, ateliers)</u>	
➤ 2 Missions sud-nord	
1 mission de 1 mois Dakar -Toulouse -Dakar.....	1 900 000 FCFA
1 mission de 1 mois Cameroun- Toulouse -Cameroun.....	1 900 000 FCFA
1 mission de 2 mois (Dakar -Clermont Ferrand -Nantes –Dakar)....	5 000 000 FCFA
➤ 2 Missions sud-sud	
1 mission de 1 mois Dakar- Cameroun- Dakar	1 000 000 FCFA
1 mission de 1 mois Cameroun- Dakar- Cameroun.....	1 000 000 FCFA
➤ Formation (Collecte et traitement de données radar band S aux USA)	
-Mission aux USA pour 3 personnes pendant 3 semaines	9 800 000 FCFA

➤ Conférences et ateliers	
-2 Ateliers sur la collecte des données radars et disdromètres	1000 000 FCFA
-6conférences AMMA (billets , perdiems, frais de participation)	14 900 000 FCFA
Campagnes de mesures (EOP, SOP1, SOP2 et SOP3)	
➤ Mesures disdrométriques et paramètres d'environnement	10 000 000 FCFA
-CapVert (transport + logistique+ frais de subsistance).....	10 000 000 FCFA
-Fouta Djallon (transport + logistique+ frais de subsistance).....	15 000 000 FCFA
➤ Mesures Radar (Band C et band S)	
<u>Bourses (informaticien et étudiants)</u>	
➤ 1 Informaticien	3 000 000 FCFA
➤ 4 bourses pour étudiants (durée de 4 an)	8 000 000 FCFA
TOTAL BUDGET ESTIMATION	
130 242 000 FCFA	

II-3 DYNAMIQUE DES SYSTEMES CONNECTIFS DE MESO-ECHELLE (MCS)

Mariane Diop Kane (PI) ^{*}, Saidou Moustapha Sall ^{**}, Amadou Thierno Gaye ^{**}, Madiagne Thiaw ^{***}, Aida Diongue Niang ^{*}, Pascal Sagna ^{****}

* Direction de la Météorologie Nationale

** LPA, UCAD

*** Représentation de l'ASECNA

**** Département de géographie, UCAD

II-3-1 INTRODUCTION /PROBLEMATIQUE

En Afrique de l'ouest, les précipitations sont essentiellement d'origine convective. La convection s'organise généralement en systèmes convectifs qui fournissent plus de 90% de la pluviométrie dans le Sahel (D'amato et Lebel, 1998). Leurs statistiques : taille, nombre, durée de vie, genèse au niveau de l'orographie sont bien documentés (Rowell et Milford, 1993, Laing et Fritsch, 1993, Desbois et al, 1998, Mathon et Laurent, 2001, Gaye et al, 2003 ...). Il est aussi bien connu que ces systèmes convectifs interagissent avec les ondes d'est et le jet d'est africain (Sall, 1977). Cependant la relation entre ondes d'est, systèmes convectifs et pluviométrie reste encore ambiguë. Les premiers résultats de GATE (Reed et al, 1977, Payne et Mcgarry, 1977) ont montré un maximum de précipitations ou de couverture nuageuse à l'avant du thalweg de l'onde. Plus récemment Duvel (1990) a établi une relation dépendant de la latitude; un maximum de couverture nuageuse à l'avant du thalweg au sud de 12N et à l'arrière du thalweg au nord de 12N. Ces analyses composites ont masqué la variabilité de la relation décelée par l'étude individuelle des ondes de Diop (1998, 2000, 2003). Les dernières investigations de Diop et Parker (2002) ont permis de découpler l'effet des ondes d'est à celui de l'orographie.

En contre partie de l'influence de l'environnement sur le développement des systèmes convectifs, la convection a un grand impact sur l'environnement (Moncrief et Miller, 1976), notamment sur la surface, la couche limite, les jets et les ondes d'est. Diongue et al, 2002 ont mis en évidence ces rétroactions sur un cas de ligne de grains ouest africaine grâce au modèle numérique Méso-NH.

Les systèmes convectifs soudano-sahéliens parviennent souvent jusqu'aux côtes atlantiques et parfois poursuivent leur déplacement bien au delà. A la fin de leur parcours continental, certaines perturbations s'affaiblissent et se dissipent sur l'océan non loin de la côte, alors que d'autres se renforcent. Ces derniers semblent jouer un rôle déterminant dans la genèse des cyclones tropicaux

(Gray et Landsea, 1992). Sall et Sauvageot, 2004 ont analysé sur l'Atlantique le processus de cyclogénèse observé à partir d'une transformation d'un système convectif d'origine africaine. Malgré ces résultats, les études de cyclogénèse sur l'Atlantique à partir de la convection d'origine africaine restent encore limitées.

AMMA, avec la multitude d'observations prévues et la longue durée du projet, nous offre une grande opportunité de mieux comprendre le comportement des systèmes convectifs dans le milieu météorologique et leurs interactions. Une étude sur plusieurs saisons nous permettra de définir de manière systématique les conditions de développement des systèmes convectifs. Ce sera un premier pas pour améliorer la prévision qui se base aussi sur les modèles numériques.

II-3-2 BUT

Le but du projet est d'améliorer notre compréhension des systèmes convectifs et leurs relations avec l'environnement synoptique en Afrique de l'ouest et sur l'Atlantique, en vue de mieux les prévoir.

II-3-3 OBJECTIFS SPECIFIQUES

- Construire durant la LOP et les SOP une climatologie définitive et à long terme, des systèmes convectifs et de l'environnement synoptique où ils se développent. Il s'agira d'établir des statistiques sur les systèmes convectifs. On définira entre autres les types de systèmes convectifs, leurs nombres, la pluviométrie associée, les éclairs, les caractéristiques des hydrométéores ...On étudiera aussi la concentration d'aérosols de l'atmosphère avant et après le passage de systèmes convectifs. Cette étude sur plusieurs saisons nous permettra aussi d'établir la variabilité inter et intrasaisonnière des systèmes convectifs et de certains phénomènes synoptiques (eg ondes d'est).
- Quantifier de manière significative la relation entre les systèmes convectifs, la topographie et l'environnement synoptique (y compris ondes d'est, JEA, flux de mousson, état de la couche limite...) Il s'agit de déterminer les conditions atmosphériques dans lesquelles les systèmes convectifs sont générés, évoluent en phase mature et se dissipent, et ce en rapport avec l'orographie et le passage des ondes d'est. Les investigations porteront aussi sur le lien entre la convection d'origine africaine et l'activité cyclonique sur le bassin Atlantique, de même que l'ensemble des processus qui entrent en jeu lors du passage des systèmes du continent vers l'océan.

- Déterminer et quantifier avec les observations la rétroaction de la convection sur l'environnement : il s'agit de déterminer comment le flux de mousson dans la couche limite, les jets en altitude et les ondes d'est sont modifiés après le passage des systèmes convectifs, leur temps de recouvrement.
- Etudier la structure interne des MCS au Sénégal, dans le bassin du Ferlo, et sur la zone de Linguère-Barkédji.
- Etudier les caractéristiques physico-chimiques des précipitations au niveau des zones précédemment citées.

II-3-4 OUTILS ET METHODOLOGIE

Les différents projets de recherche utiliseront essentiellement les observations, (synoptiques, radiosondages, pilotes, dropsondes, sondes aéroportées, profileurs RASS), les réanalyses, l'imagerie satellitaire et le radar. Les données recueillies ou constituées seront archivées et mise à la disposition de la communauté scientifique selon le protocole d'accord.

Les MCSs seront observés et suivis sur les images du satellite Météosat (réception MSG à la DMN et au Centre de Prévisions ASECNA). Le radar bande S de la DMN, installé dans la zone de Linguère au sein du Super-site du Ferlo, permettra de suivre les différentes cellules convectives du système, d'assurer une surveillance continue du Super-site et de la zone de mesures intensives (mésos-échelle) et d'effectuer des mesures hydrologiques. Le radar installé à l'aéroport de Dakar-Yoff (bande C) assurera des mesures hydrologiques et le suivi des modifications des MCS au franchissement de la côte. En association avec le radar de Linguère, des évaluations quantitatives des paramètres hydrologiques seront effectuées sur l'ensemble du Sénégal (voir proposition Estimation des Pluies). Ces observations pourraient être comparées à des produits de satellite (TRMM PR, SSMI, METEOSAT,).

A l'échelle régionale, la disponibilité des radars de Bamako, Ouagadougou et Niamey permettrait d'assurer le suivi des MCS sur l'ensemble de la bande sahélienne, sur le transect zonal AMMA. Pour cela il faudra construire une mosaïque des champs des différents radars.

Un certain nombre d'instruments seront déployés en relation avec les autres communautés AMMA : un radar bande S (NPol de la NASA), des pluviographes numériques (40 à 50), 2 disdromètres (un au LPA, un dans le super Site), une tour avec des capteurs de mesures de flux, des ballons-sondes (tethered balloons), un capteur de mesures de décharges électriques (LIS) installé à la DMN.

Des expériences ciblées et intenses sur le Super- Site instrumenté et le transect zonal sahélien de AMMA seront menées. Ces expériences, inscrites dans le programme AMMA, bénéficieront ainsi également des infrastructures et des produits du programme international.

Quelques cas de MCS typiques de la région seront ultérieurement simulés à l'aide de modèles à aire limitée. Les modèles opérationnels prévus dans le projet 'Prévision et modélisation' seront utilisés, sinon les simulations se feront en collaboration avec les laboratoires étrangers.

II-3-5 PROJETS DE RECHERCHE ET PERSONNES IMPLIQUEES

1. Interactions/ Rétroactions entre les systèmes convectifs et l'environnement synoptique ; Dr Mariane Diop Kane, Dr Amadou Gaye, Dr Aida Diongue Niang, Madiagne Thiaw
2. Genèse des systèmes convectifs ; Dr Mariane Diop Kane, Dr Amadou Gaye, Dr Pascal Sagna, Dr Saïdou Moustapha Sall, Sagna, Madiagne Thiaw, Mactar Camara
3. Cyclogenèse atlantique ; Dr Saidou Moustapha Sall, Dr Mariane Diop Kane, Dr Aida Diongue Niang,
4. Statistiques sur les systèmes convectifs et les ondes d'est ; Dr Mariane Diop Kane, Dr Amadou Gaye, Dr Pascal Sagna, Dr Saïdou Moustapha Sall, Madiagne Thiaw, Mactar Camara
5. Etude des caractéristiques physico-chimique des systèmes convectifs par le biais d'une campagne de mesures ; Dr Amadou Gaye, Dr Ababacar NDiaye, Madiagne Thiaw
6. Etude de la structure interne des systèmes convectifs ; Dr Amadou Gaye

II-3-6 RESULTATS ATTENDUS

- Une meilleure connaissance des systèmes convectifs et leurs interactions/ rétroactions avec l'environnement en Afrique occidentale et sur l'atlantique
- Une détermination des apports pluviométriques des systèmes convectifs et leur variabilité
- Des statistiques sur les systèmes convectifs
- L'influence de l'orographie africaine sur la dynamique des systèmes convectifs
- Amélioration de la prévision opérationnelle
- Connaissance de la structure interne des MCS au Sénégal
- Connaissance des caractéristiques physico-chimiques des précipitations au Sénégal
- Une meilleure collaboration entre la DMN, l'ASECNA, le LPASF, le département de géographie et les laboratoires étrangers
- Un rapport de stage

- Des publications
- Une banque de données

II-3-7 CHROGRAMME

Phase 1 : Pre-EOP et EOP (2005-2006)

- Instrumentation de sites
- Formation du personnel chargé de la collecte des données et de la gestion des appareils
- Collecte et analyse de données
- Ateliers et conférence AMMA

Phase 2 : Pre-SOPs, SOP0, SOP1, SOP2 et SOP3 (2006)

- Déploiement des instruments restants
- Campagne de mesures intensives
- Collecte et analyse des données
- Ateliers AMMA

Phase 3 : 2007 et 2008

- Collecte et analyse des données
- Modélisation de cas de systèmes convectifs
- Rédaction de publications
- conférence AMMA

II-3-8 BUDGET

	<i>nombre</i>	<i>Total (FCFA)</i>
Equipement		
<i>Serveur d'archivage</i>	<i>1</i>	<i>12000000</i>
<i>PC</i>	<i>4</i>	
<i>Imprimante couleur</i>	<i>1</i>	<i>6800000</i>
<i>Extra disque 9Gbyte</i>	<i>1</i>	<i>510000</i>
Sous-Total		<i>466000</i>
		19776000
Consommables		
<i>Licence IDL</i>	<i>1</i>	<i>1825000</i>
<i>Compilateur Fortran</i>	<i>1</i>	<i>1551000</i>
<i>Flash disques, CD, Papier, Transparents et Cartouches</i>		<i>500000</i>
<i>Logiciel de cartographie</i>	<i>1</i>	<i>400000</i>
Sous-Total		476000
Formation		
<i>Bourse de stage (60 000 F x 6 mois x 3 ans)</i>	<i>2</i>	2160000
Voyages		
3 Conférences		
<i>Billets, per diems, frais de participation</i>		8936000
Publication		
<i>2 articles</i>		2400000
Total		39248000

II-3-9 BIBLIOGRAPHIE

D'Amato, N. and T. Lebel, 1998: On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability, *Int. J. Climatol.*, **18**, 955-974.

Diongoue A., Lafore J.-P, Redelsperger J.-L. and Roca R., 2001: "Numerical study of a sahelian synoptic weather system: Initiation and mature stage of convection and its interactions with the large scale dynamics", *Quart. J. R. Met. Soc.*, **128**, 1899-1927.

Diop, M and D. Parker, 2002 ; Initiation of convective systems in Subsaharan northern Africa. In *Proceedings of the 25th Conference on hurricanes and tropical meteorology*, 29 Avril-3 Mai, San Diego, Californie, pp387-388.

Diop, M, 1998; The influence of weather systems on satellite rainfall estimation with application to river flow modelling. PhD thesis, University of Reading, 225p.

Diop, M. and D.I.F. Grimes 2003; Satellite-based rainfall estimation for river flow forecasting in Africa. II: African easterly waves, convection and rainfall. *Hydrological Sciences*: **48**, 585-599.

Diop, M., D.I.F. Grimes et G. Dugdale; 2000; African easterly waves and convection; in WMO TMRP No 63, pp 67-71.

Duvel, J.P., 1990: Convection over tropical Africa and the Atlantic ocean during northern summer. Part II: Modulation by easterly waves. *Mon. Wea. Rev.*: **118**, 1855-1868.

Fortune, M., 1980: Proprieties of squall lines inferred from time-lapse satellite imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 153-168.

Gaye, 2002 : Caractéristiques dynamiques et pluviosité des Lignes de grains en Afrique de l'Ouest, Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences, UCAD, 129 pp

Gaye, A. T., A. Viltard and P. de Félice, 2004 : Squall lines and rainfall over western Africa during summer 1986 and 87, en revue "*Meteor. Atm. Phys.*"

Gray and Landsea, 1992: William M. Gray and Christopher W. Landsea. 1992: African Rainfall as a Precursor of Hurricane-Related Destruction on the U.S. East Coast. *Bulletin of the American Meteorological Society*: Vol. 73, No. 9, pp. 1352–1364.

Hodges, K.I., and C.D. Thorncroft, 1997: Distribution and Statistics of African Mesoscale Convective Weather Systems Based on the ISCCP Meteosat Imagery, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2821.

Jenkins, G. S., G. Adamou, S. Fongang, 2002: The challenges of modeling climate variability and change in West Africa, *Climatic Change*, **52**, 263-286

Laing, A. G. and J. M. Fritsch, 1993: Mesoscale convective complexes in Africa, *MWR*, **121**, 2254-2263, 1993.

Laing, A.G. and J. M. Fritsch, A. J. Negri, 1999: Contribution of Mesoscale Convective Complexes to Rainfall in Sahelian Africa: Estimates from Geostationary Infrared and Passive Microwave Data, *J. Applied Meteorology*, **38**, 957-964.

Mathon V. and H. Laurent, 2001: Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, 377-406.

Mathon, V., H. Laurent, and T. Lebel, 2003: Mesoscale convective system rainfall in the Sahel. *J. Applied. Meteor.*,

Mohr, K. I., and E. J. Zipser, 1996: Defining mesoscale convective systems by the 85-GHz ice scattering signatures, *BAMS*, **77**, 1179-1188.

Moncrief, M.W. et M.J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Q.J.R.M.S.*: **102**, 373-394.

Nesbitt, S. W., Zipser, E. J., Cecil, D. J., 2000: A census of precipitation features in the tropics using TRMM: Radar, ice scattering and lightning observations. *J. Clim*, **13**, 4087-4106.

Payne, S.W. et M.M. Mcgarry, 1977: The relationship of satellite inferred convective activity to easterly waves over West Africa and the adjacent ocean during phase III of GATE. *Mon. Wea. Rev.*: **105**, 413-420.

- Peters, M.G., W. Tetzlaff, and W. Janssen, 1989: Rainfall intensity of West African squall lines, *Annales Geophysicae*, **7**, 227-238.
- Reed, R. J., D.C. Norquist et E.E Recker, 1977: The structure and properties of African wave disturbances as observed during phase III of GATE. *Mon. Wea. Rev.*: **105**, 317-333.
- Rowell, D.P., and J. Milford, 1993: On the generation of African squall lines, *J. Climate*, **6**, 1181-1193.
- Sagna P., 1988 : Etude des lignes de grains en Afrique de l'ouest. Thèse de doctorat de 3^e cycle. Université Cheikh Anta Diop , Dakar.
- Sall, S., M., 1997 : Interaction entre les ondes tropicales et les systèmes convectifs sur l'Afrique de l'Ouest durant l'été des années 1990, 1993 et 1994. *Thèse de Docteur –Ingénieur, ESP, Univ. C. A. Diop de Dakar*, 131pp.
- Sall, S. M., A. T. Gaye, S. Fongang and A. Viltard, 2000 : Générations et Dissipations des Systèmes Convectifs sur l'Afrique de l'Ouest durant l'été 1999, *Publications Association Internationale de Climatologie*, vol 12, 422-429.
- Sall, S. M., and H. Sauvageot, 2004 : Cyclogenesis off the African Coast : the case of Cindy in August 1999. (submitted to *Monthly Weather Review*).

II-4 AEROSOLS- CHIMIE- PROCESSUS RADIATIFS- POLLUTION

Seydi Ababacar Ndiaye* (PI) , Amadou Thierno GAYE* (co-PI), Ibrahima Hamza**

* Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang (LPA-SF)/ ESP/ Université C.A.D.

** Ecole Africaine de la Météorologie et de l'Aviation Civile (EAMAC) /ASECNA, Niamey

Propositions

Proposition 1 : visibilité et épisodes chasse-sable ;

Proposition 2 : bilan radiatif : caractéristiques physiques et optiques de l'aérosol saharien (en divers environnements : urbain, périurbain, rural et diverses conditions météorologiques)

Proposition 3 : chimie de l'atmosphère et des eaux de pluie

Proposition 4 : pollution de l'air

II-4-1 INTRODUCTION

En Afrique de l'Ouest, se trouvent de vastes régions sources d'aérosols : aérosols terrigènes dans les zones arides du Sahel et désertiques du Sahara et aérosols carbonés provenant de la combustion de biomasse. De nombreuses opportunités d'étude des aérosols et de leur influence sur le climat sont ainsi offertes. Selon IPCC (2001) il persiste de nombreuses incertitudes sur l'influence de l'aérosol atmosphérique sur le climat global. Le caractère hydrosoluble de ces particules d'aérosols est mal connu (Levine et al. 1996). D'autre part d'importantes quantités de poussières se déplacent chaque année du continent africain à l'océan Atlantique en association avec le SAL. Les impacts sur la santé des populations et d'autres secteurs d'activités (transport aérien, maritime et routier) méritent aussi qu'on s'intéresse à une meilleure connaissance des aérosols.

II-4-2 OBJECTIFS GENERAUX

- caractérisation de la physico-chimie des aérosols et de leur effet radiatif;
- impacts des aérosols sur des phénomènes météorologiques : distributions spatio-temporelles et propriétés des poussières minérales en relation avec les paramètres climatiques (mousson, jets, ...) et météorologiques (ondes d'Est, MCS et cyclones tropicaux)
- phénomènes de rétroaction : aérosols- climat

- impact sur la santé et les établissements humains (en relation avec le groupe environnement- climat-santé)
- visibilité en épisode chasse- sable

II-4-3 Proposition 1 : LA VISIBILITE CLIMATOLOGIQUE EN EPISODE CHASSE SABLE AU SAHEL

II-4-3-1 Introduction

Au delà des aspects relatifs à la force du vent associée au phénomène chasse sable ou tempête de poussière- sable, la réduction de la visibilité est la conséquence météorologique la plus immédiate d'un événement litho météo sur l'environnement global.

Les suspensions de particules de sable ou de poussière constituent de graves dangers pour l'aéronautique, la santé publique et autres domaines d'activités socio-économiques du monde sahélien.

L'approche synoptique et même locale de ce paramètre reste aujourd'hui encore subjective.

Ceci exige des efforts supplémentaires de la part de la communauté scientifique et des météorologistes opérationnels dans le but de mieux répondre aux demandes croissantes des usagers.

Le problème de prévision quantitative de la visibilité en épisode chasse sable doit être vu sous un angle plus général d'occurrence chasse sable dans le nouveau contexte mondial de prévision numérique du temps utilisant les nouvelles technologies, et tenant compte des particularités des terrains et des mutations climatiques au Sahel.

II-4-3-2 Problématique

Si l'estimation de la visibilité en un lieu donné est une pratique d'observations météorologiques rendue facile grâce aux repères naturels et/ou artificiels, la prévision de ce paramètre demeure encore une véritable préoccupation pour le prévisionniste.

A défaut de règles ou lois physiques générales liant la visibilité à un (ou plusieurs) paramètre donné de l'atmosphère, ou de l'environnement terrestre, on est amené à chercher une relation statistique entre le pouvoir de déflation des particules de sable/poussière et la visibilité associée.

Ceci est d'autant plus critique qu'il s'agisse de la phase de déclenchement chasse sable/tempête de poussière /sable.

Il y aurait sans nul doute une relation entre le vent, son efficacité et la nature du sol avec la visibilité en phase de déclenchement.

Nous chercherons donc à établir cette relation sur quelques sites du domaine source sahélien. Cette relation si elle existe serait un élément climatologique à prendre en compte dans les routines de prévisions météorologiques.

Des études statistiques sur l'occurrence de chasse sable sur les stations de Bilma et d'Agadez au Niger ont fait ressortir l'existence des domaines privilégiés de formation ou d'apparition de ce phénomène.

Il s'agit à présent de mener des études similaires sur d'autres sites du Sahel (exemples de Gao au Mali, Faya au Tchad, Nouakchott en Mauritanie) en relation avec la visibilité.

Nous estimons que la modélisation du phénomène chasse sable au Sahel passe nécessairement par l'établissement de ces relations qui ont la valeur de constantes pour la mise au point, le calibrage ou l'adaptation d'un modèle de prévision de litho-météores au Sahel.

II-4-3-3 Objectifs

L'objectif poursuivi à travers cette étude est de chercher à mieux identifier et caractériser les composantes chasse sable au Sahel, leur variabilité et leur occurrence en relation avec la visibilité.

Au delà, les résultats devraient servir de base pour la modélisation, la validation ou l'adaptation d'un modèle ou schéma de prévision de litho-météores en Afrique occidentale et centrale.

II-4-3-4 Méthodologie

Notre approche de ce sujet consistera dans un premier temps à parcourir un grand nombre d'événements litho-météores de types chasse sable, tempête de poussière sable au Sahel en notant tous les paramètres atmosphériques associés (pression, tendance barométrique, le degré d'humidité) ainsi que la visibilité.

Nous utilisons à cet effet les cartes synoptiques du CMP de Niamey, les sorties des modèles du centre ACMAD et les carnets d'observations de la direction nationale de la météorologie du Niger.

Nous étudierons par la suite les fréquences d'occurrence du phénomène chasse sable par site en intégrant avec les prédictors potentiels et la visibilité.

Enfin, nous nous intéresserons aux influences des particularités du terrain dans les principaux sous espace ou domaines climatiques du Sahel et leurs éventuelles évolutions dans le temps.

II-4-3-5 Résultats attendus

- Détermination d'une loi de distribution de chasse sable (ou tempête de poussière sable au Sahel) ;
- Modélisation des processus litho-météores intégrant les paramètres d'état et la composante visibilité.

II-4-4 Proposition 2 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET OPTIQUES DE L'AEROSOL SAHARIEN

II-4-4-1 Introduction

Le cycle saisonnier des poussières sur l'Afrique de l'Ouest est très lié aux processus météorologiques associés à la mousson ouest africaine (WAM). La production de poussières et la propagation des feux sont favorisées par les conditions de sécheresse. Aussi tout processus climatique affectant la WAM influencera également le taux de production et l'exportation de ces aérosols. De façon similaire, le transport de ces aérosols sur l'océan Atlantique tropical est contrôlé par les processus météorologiques sur l'Afrique de l'Ouest et est lié à la circulation de grande échelle. A cause de ce

couplage, les aérosols émis par les sources sont exportés avec une grande efficacité et sont transportés sur de longues distances.

Les poussières ont un impact important sur le bilan radiatif de la terre. Des campagnes de mesures récentes (Tarfox, Indoex, Meduse) ont montré que l'impact de l'aérosol atmosphérique sur le système climatique, peut être, au niveau régional et local, plus important que celui des gaz à effet de serre. Sur les océans en l'absence de nuages les poussières peuvent produire un fort refroidissement local en surface. Cet effet peut atteindre -130 W/m^2 au cours d'importants épisodes de poussières (Haywood et al. 2003) qui réfléchissent le rayonnement solaire vers l'espace. Au contraire les poussières peuvent absorber le rayonnement terrestre et agir comme les GES en causant un réchauffement de l'atmosphère (Haywood et al. 2003 ; Vogelmann et al., 2003). Le forçage radiatif des aérosols est intimement lié au rayonnement solaire et au rayonnement infrarouge thermique.

L'objectif général de cette proposition est de caractériser les propriétés microphysiques et optiques (épaisseur optique, albédo, et fonction de phase) de différents types d'aérosols en zone sahélienne, d'étudier les facteurs qui les contrôlent et d'analyser leur impact radiatif.

Trois échelles spatiales sont considérées dans cette étude :

- échelle de la ZAS (Zone AMMA Sénégal)
- zone ZAP (Zone Agro- Pastoral)
- Sahel.

Les objectifs spécifiques sont :

- détermination du bilan radiatif;
- détermination des caractéristiques optiques et microphysiques des aérosols (minéraux et organiques) qui déterminent leur impact radiatif direct ;
- distribution multidimensionnelle (espace et temps) des aérosols (minéraux et organiques) ;

II-4-4-2 Méthodes et protocole d'observations

La campagne de mesures sur la ZAS permettra de mettre en jeu un ensemble d'instruments en synergie avec les autres groupements AMMA/MAMMA : mesures in-situ (compteurs, impacteurs, pyranomètres, pyrhéliomètres, ...), télédétection au sol (photomètre solaire, lidar MPL, ...) et satellite, permettant la caractérisation physico-chimique et optique des aérosols côtiers et

continentaux. Nous proposons de réaliser l'expérience sur différents sites de mesures : urbain, péri-urbain (zone côtière) et rural lors de conditions météorologiques différentes, puis d'évaluer l'impact radiatif direct de l'aérosol en zone rurale et en zone plus anthropique.

- **La connaissance des aérosols à travers le réseau de photomètres solaires PHTO/AERONET**

Le réseau de mesures PHOTON/AERONET, constitué de photomètres automatiques est en opération depuis 1993. Ces photomètres permettent de remonter à la composition en aérosols (contenu total et granulométrie), albédo et contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Les stations AERONET situés en Afrique de l'Ouest se trouvent au Niger, au Sénégal, au Cap Vert, au Burkina-Faso et au Nigéria. Cet observatoire s'est enrichi par l'implantation de sites permanents ou par des campagnes scientifiques limitées dans le temps (Indoex, Shade) avec un ensemble d'instruments au sol (lidar), aéroportés ou satellitaires en complément du photomètre.

Un micro lidar (Micro Pulse Lidar ou MPL) est en cours de négociation avec le réseau MPL-NET. Il pourrait être installé soit à Dakar (LPA-SF) soit à Mbour sur le même site que le photomètre solaire. Cette deuxième option offre l'avantage de permettre un inter-étalonnage des 2 instruments.

- **Mesures de rayonnements**

- Il s'agit de mesures de différentes composantes du rayonnement solaire (direct, diffus, global), des rayonnements IR thermique et UV.

- Instruments à implémenter : 4 pyranomètres (muni d'un suiveur solaire), 4 pyréliomètres placés en losange dans la Zone Amma Sénégal (ZAS) ; 1 MFR-SR (Multifilter rotating shadow band radiometer) ; pyranomètre UVB-1 ;

- **Propriétés optiques des aérosols** : Photomètre solaire (réseau AERONET installé à Mbour), lidar MPL (réseau MPLnet) ;

- **Concentration et granulométrie des aérosols** : Analyseur de poussières ; compteurs de particules, impacteurs à cascades

- **Radiosondages** (Dakar, Tambacounda, Linguère ?)

- **Observations météorologiques en surface (P, T, U, V) et précipitations**

II-4-4-3 Résultats attendus

- Utilisation de stations de mesures sol couplant photomètre, lidar et mesures de rayonnement pour valider les produits des missions spatiales, type AQUA TRAIN, mettant en oeuvre des imageurs passifs (PARASOL, MODIS) et comme données d'entrée de modèles (RegCM).
- Profils verticaux des propriétés optiques des aérosols sur divers sites (zones rurale, urbaine, périurbaine, côtière, continentale, ...).
- Détermination du bilan radiatif
- Forçage radiatif direct des aérosols à partir de mesures de profondeurs optiques.
- Utilisation de ces résultats dans les études d'impacts : santé (distribution spatio-temporelle des aérosols) et agriculture (bilan radiatif).

II-4-4-4 Références bibliographiques

Haywood et al. 2003 : Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during Saharan Dust Experiment (SHADE). 1: Solar spectrum, *J. Geophys. Res.*, 108(D18), doi:10.1029/2002JD002687

IPCC, 2001: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by J. T. Houghton et al., 881 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 2001.

Levine, J. S., W. R. Cofer III, D. R. Cahoon, Jr., E. L. Winstead, D. I. Sebach, M. S. Scholes, D. A. B. Parsons and R. J. Scholes, 1996. Biomass Burning, Biogenic Soil Emissions, and the Global Nitrogen Budget. In: *Biomass Burning and Global Change*. Levine, J. S. (ed.). MIT Press, Cambridge, Mass., pp.370-380.

Vogelmann, A. M., P. J. Flatau, M. Szczodrak, K. M. Markowicz, and P. J. Minnett (2003), Observations of large aerosol infrared forcing at the surface, *Geophys. Res. Lett.*, 30(12), 1655, doi:10.1029/2002GL016829.

II-4-5 Proposition 3 : CHIMIE DE L'ATMOSPHERE ET DE L'EAU DE PLUIE (voir dynamique des MCS)

Objectifs

Il s'agit d'étudier la chimie hétérogène dans les MCS en évaluant :

- l'évolution des gaz en trace dans les masses d'air pénétrant les MCS (lignes de grains sahéniennes) ;
- L'évolution des aérosols de différentes origines dans les MCS ;

- La solubilité des aérosols sahariens.

Collaborations (propositions 1, 2, 3)

Réseau AERONET (contacts : LISA, Université Paris 12)

Réseau MPLnet (contact : Judd Welton, NASA GSFC ; Gregory Jenkins, Howard University)

II-4-6 Proposition 4 : POLLUTION (Projet POLCA)

Cette proposition fait suite à une expérience de 2 semaines de mesures de polluants dans 10 capitales africaines. Le but de cette proposition est de systématiser ces mesures dans ces dix capitales africaines sur plusieurs saisons. Seydi Ababacar Ndiaye (LPA-SF) est un intervenant de cette proposition qui est aussi une contribution régionale au Plan d'Implémentation Africain.

II-4-7 RESSOURCES ET COMPETENCES (Propositions 1, 2, 3)

Amadou Thierno Gaye, LPA-SF/ ESP, Dakar, Sénégal

Ibrahima Hamza, EAMAC, Niamey, Niger

Seydi Ababacar Ndiaye, LPA-SF/ ESP, Dakar, Sénégal

1 étudiant en thèse

2 stagiaires (Ingénieur)

II-4-8 BUDGET (propositions 1, 2)

	2005	2006	2007
Phases SOP 0, 1, 2 ,3		10 000 000	
Frais de campagne de mesures intensives (5 mois)			
Missions de collecte et suivi (EOP, 3 ans)	5 000 000	0	5 000 000
Stations automatiques (2)	10 000 000		
Mesures de paramètres météo (3)			
rayonnement	7 000 000		
- 4 pyranomètres (avec stations automatiques)			
- 4 pyréliomètres (avec stations automatiques)			
-1 Multifilter rotating shadow band radiometer			
- 1 pyranomètre UVB-1			
aérosols	5 000 000		
1 impacteur à cascade (9 couches)			
1 compteur de particules			
Formation			
Bourse de Thèse (120 000 F x 12 mois x 3 ans)	1 440 000	1 440 000	1 440 000
Bourse de stage (60 000 F x 2 x 3 mois x 3 ans)	1 080 000	1 080 000	1 080 000
Informatique			
4 PC de bureau (4x 1 million)	4 000 000		
3 Ordinateurs portables (3x 1,5 million)	4 500 000		
Conférence, Publications (participation à des conférences, séminaires et ateliers)	1 000 000	1 000 000	1 700 000
Sous- Total annuel	29 020 000	13 520 000	9 220 000
TOTAL	51 760 000 FCFA		

II-4-9 CHRONOGRAMME

Phase 1 : Pre-EOP et EOP (2005)

- Instrumentation de sites
- formation du personnel chargé de la collecte des données et de la gestion des appareils
- ateliers et conférence AMMA

Phase 2 : Pre-SOPs, SOP0, SOP1, SOP2 et SOP3 (2006)

- déploiement des instruments restants (Lidar, etc ...)
- Campagne de mesures intensives
- Traitement et analyses des données

- Rapport sur les campagnes et de mesure et l'état de la base de donnée
- ateliers AMMA

Phase 3: 2007 et 2008

- continuation des mesures EOP
- Traitement et analyse des données
- Rédaction de publications
- conférence AMMA

II-5 MODELISATION ET PREVISIONS

Personnes impliquées : Aïda Diongue NIANG* (PI), Chérif DIOP*, Amadou GAYE**, Mariane Diop KANE*, Ousmane NDIAYE*, Saïdou Moustapha SALL**, Abdoulaye SARR***, Bamba SYLLA**, Assane SENE*, Moussa Yoro THIAM ****, Madiagne THIAW***, Wassila THIAW*

*Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal

**LPASF Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang

***Service météorologique de la « Représentation de l'ASECNA » au Sénégal

**** ASECNA / «Activités Nationales du Sénégal »

La modélisation joue un rôle central dans le projet AMMA. Elle fait partie, au même titre que les observations, des méthodes et outils utilisés pour atteindre les objectifs du projet AMMA. La modélisation permet non seulement de développer des systèmes de prévision à plusieurs échelles (courte échéance, climatique) mais également de mieux comprendre les processus impliqués dans le système de mousson. Ainsi, les produits issus des modèles numériques, qu'ils soient des analyses, des prévisions (à plusieurs échelles) ou des éléments permettant de comprendre certains processus sont utilisés pour faire des études spécifiques ou des applications liées au système de mousson de l'Afrique de l'ouest (hydrologie, agriculture, pastoralisme, santé, ...). A ce titre, le groupe « Modélisation et Prévision » servira également d'appui aux autres groupes.

Nous voulons saisir l'opportunité qu'offre le projet AMMA avec le jeu de données qui sera disponible pour validation et les possibilités de collaboration pour développer l'utilisation de l'outil numérique aussi bien pour la prévision opérationnelle que pour la recherche. Des expertises « individuelles » en modélisation atmosphérique se sont développées au Sénégal avec des chercheurs de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang (LPASF). Il s'agit maintenant de mettre en commun ces expertises pour développer la modélisation de manière pérenne dans les dits instituts dans le but de renforcer leurs capacités.

Trois thématiques sont considérées dans ce groupe:

- i. Modélisation et Prévision à courte échéance,
- ii. Prévision saisonnière,
- iii. Changements climatiques au Sahel,

II-5-1 MODELISATION ET PREVISION ET PREVISION A COURTE ECHEANCE

II-5-1-1 Problématique

Pour la météorologie, la prévision à courte échéance ou prévision du temps constitue l'aspect le plus visible au niveau du public. Pour l'élaboration de la prévision du temps, les prévisionnistes utilisent comme support la prévision numérique du temps à laquelle ils superposent les observations disponibles et des techniques empiriques. Cependant, l'utilisation de la prévision numérique en Afrique de l'ouest se limite à l'utilisation de sorties de modèles globaux disponibles sur le Système Mondial de Transmission (ARPEGE, Modèles du CEPMMT, de UK Met. Office, ...).

Outre la rareté des produits, les *prévisions* issues de ces modèles dans les zones tropicales s'écartent souvent de la réalité et cela est d'autant plus important que l'échéance de prévision est longue. Cette contre performance est liée essentiellement à quatre types problèmes :

1.La rareté des observations permettant une bonne construction de l'état initial à partir duquel les modèles sont lancés pour donner des prévisions. Cela est lié non seulement à la pauvreté du réseau d'observations (notamment en altitude) mais également à des problèmes de transmission en temps réel des données aux centres qui font tourner des modèles globaux.

2.Une mauvaise prise en compte des processus physiques de la région de mousson de l'Afrique de l'ouest dans les modèles. Ceux-là ont souvent des paramétrisations inadéquates ou souvent validées pour les régions tempérées. Par exemple, les résultats récents de la campagne JET2000 (Thorncroft et al, 2003, Diongue et al, 2002) montrent que le modèle du Centre Européen donne une analyse (prévision plus assimilation de données) assez réaliste de la région de mousson africaine durant la campagne JET2000 alors que les prévisions (uniquement la physique et la dynamique du modèle) s'écartent assez loin des observations.

3.La difficulté liée à la prévisibilité des phénomènes convectifs qui constituent l'essentiel des systèmes pluvieux dans les régions tropicales. Cette difficulté est liée au caractère sporadique et à la complexité du phénomène qui met en jeu une multitude de processus à des échelles spatio-temporelles différentes. Des résultats obtenus à partir des modèles résolvant explicitement la

convection (par exemple Mésos-NH) ont montré qu'il était possible de simuler correctement le cycle de vie des phénomènes convectifs (Diongue *et al*, 2002). Cependant pour des raisons de coût et de limitation en moyens de calculs, la convection est souvent paramétrée par des schémas de convection pour lesquels il n'existe pas de consensus (Slingo, 1994).

4. Une résolution trop faible qui ne permet pas une bonne prise en compte de la topographie et de certains phénomènes. Des études de sensibilité ont montré qu'une augmentation de la résolution améliore sensiblement les résultats (*e.g.* Diop, 2000).

Etant donné que pour des problèmes de coût et de puissance des moyens de calcul, nous ne pouvons pas tourner de manière opérationnelle un modèle résolvant explicitement la convection, le compromis c'est de tourner un modèle à aire limitée avec une résolution plus fine que celle des modèles globaux. Cela permettra de développer une expertise locale en matière de modélisation. Il s'agira d'une part d'améliorer notre compréhension des processus liés à la mousson africaine grâce à la modélisation et d'autre part, en tenant compte des résultats issus de la recherche, de développer la prévision numérique du temps.

II-5-1-2 Buts

Les buts recherchés sont au nombre de deux :

- Améliorer notre compréhension des processus physiques de la région de mousson de l'Afrique de l'ouest, notamment la convection.
- Implémenter un modèle à aire limitée opérationnel pour faire de la Prévision Numérique du Temps au Sénégal. Dans un premier temps, le modèle ne fournira que des prévisions, l'analyse sera envisagée beaucoup plus tard.

II-5-1-3 Objectifs spécifiques :

- Etude de cas de convection se développant sur le Sénégal avec des modèles à méso-échelle et des modèles à aire limitée en version recherche. Les résultats issus de ces études permettront également d'une part d'aider à la préparation de la phase d'observations spécifiques et d'autre part de mettre en place le modèle opérationnel à aire limitée et à le valider.

- Implémentation des codes sources du modèle opérationnel à aire limitée. Il s'agit ici d'adapter le modèle sur le domaine d'intérêt, de le tourner sur ce domaine et de vérifier qu'il fonctionne.
- Mise en œuvre de la chaîne opérationnelle. Il s'agit de mettre en place les interfaces nécessaires à l'exploitation des sorties du modèle (de l'acquisition des conditions initiales et aux limites au tracé des résultats devant l'écran du prévisionniste).
- Validation en temps réel du modèle opérationnel durant la période d'observations spécifiques (SOP) d'AMMA. Il s'agit, avec les mesures qui seront faites, de déterminer la capacité du modèle à bien représenter les caractéristiques du système de mousson.

II-5-1-4 Outils et méthodologies

L'outil principal est le modèle numérique. Pour les études de cas de convection, nous travaillerons avec des modèles de recherche à mésoéchelle (MésO-NH) et des modèles à aire limitée (ALADIN et ETA). Ces études se feront en collaboration avec les instituts qui développent ces modèles, respectivement CNRM et LA, CNRM ou DMN Maroc et NCEP. Pour les études pré-AMMA, les simulations se feront dans ces instituts et les résultats rapatriés pour leur analyse. Pour les études post-AMMA, les simulations se feront en priorité avec le modèle opérationnel qui aura été implémenté.

Par ailleurs, nous utiliserons le modèle de recherche MM5 du NCAR, déjà implémenté au LPASF. Ce modèle sera utilisé essentiellement pour des études de cas de systèmes convectifs de méso-échelle et pour forcer un modèle océanique.

Pour les besoins opérationnels, nous implémenterons soit le modèle ALADIN, soit le modèle ETA. Il sera nécessaire de trouver un accord avec le centre donateur pour une acquisition opérationnelle des conditions initiales et aux limites. Une aide à l'implémentation du modèle et une assistance à distance pour d'éventuels problèmes seront également sollicitées. En contre partie, nous tiendrons les centres donateurs informés des performances du modèle.

Les observations constituent également un outil important pour évaluer les simulations et valider les modèles. Les observations disponibles sur les cas étudiés seront collectées. Nous comptons beaucoup sur l'acquisition en temps réel des observations qui seront effectuées durant AMMA.

II-5-1-5 Résultats attendus

- Intercomparaison de modèles numériques sur la région de Mousson Africaine,
- Evaluation de modèles numériques sur la région de Mousson Africaine,
- Développement de l'expertise numérique,
- Modèle à aire limitée opérationnel pour la Prévision Numérique du Temps,
- Produits adaptés et disponibles pour les prévisionnistes locaux,
- Collaboration entre la DMN, l'ASECNA et le LPASF pour le développement du modèle,
- Présentation de résultats à des conférences,
- Publications de résultats.

II-5-2 PHASES DE AMMA CONCERNEES : SOP

II-5-2-1 Personnes impliquées et leur contribution

- **Dr Aïda Diongue NIAN**G, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale, travaillera sur les études de cas de convection pré-AMMA (avec Méso-Nh, ALADIN et ETA) et sur l'implémentation du modèle opérationnel et encadrera **un étudiant en DEA** pour la validation des simulations.
- **Dr Mariane Diop KANE**, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale travaillera sur les études de cas de convection observées pendant AMMA avec le modèle opérationnel.
- **Ousmane NDIAYE**, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale, en fin de thèse à l'IRI travaillera sur la validation du modèle opérationnel pendant les saisons de mousson.
- **Dr Saïdou Moustapha SALL**, chercheur au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang,, travaillera sur la simulation des études de cas de convection pré-AMMA avec Méso-NH.
- **Dr Abdoulaye SARR**, Prévisionniste au Service Météorologique de l'ASECNA, travaillera sur les simulations à l'aide du modèle MM5 qu'il a implémenté au LPASF. Il fera des inter-comparaisons avec le modèle opérationnel.

- **Madiagne THIAW**, Chef du centre de prévision au Service Météorologique de l'ASECNA, travaillera sur la validation du modèle opérationnel durant la phase d'observations renforcées de AMMA et sur la recherche des paramètres les plus pertinents pour la prévision des phénomènes tropicaux.

Collaborations nationales

- **Malamine SONKO**, expert en télécommunication, chef du centre régional de transmission de données au Service Météorologique de l'ASECNA, travaillera sur l'acquisition opérationnelle des conditions initiales et aux limites et sur la visualisation des produits numériques.
- **Chouaïbou GUEYE**, informaticien à la Direction de la Météorologie Nationale, travaillera sur la mise en place et sur le suivi de la chaîne opérationnelle et encadrera un **étudiant en informatique**.

Collaborations internationales

- **Jean-Philippe Lafore** et **Frank Roux**, respectivement au CNRM et au Laboratoire d'Aérodynamique (Toulouse) , experts du modèle communautaire Meso-NH. Ils collaborent avec Aïda Diongue Niang et Saïdou Moustapha Sall pour modéliser, avant la phase d'observations spécifiques, un cas de convection se développant en cyclogénèse.

- **Radi AJJAJI**, DMN du Maroc, expert du modèle ALADIN tourné au Maroc, collabore avec Aïda Diongue Niang pour la modélisation de cas de convection sur la région de mousson de l'Afrique de l'ouest avec le modèle ALADIN. La possibilité de faire tourner ALADIN en version opérationnelle sur une fenêtre « Afrique de l'ouest » durant la phase d'observations spécifiques est en train d'être étudiée.

- **Curt Barret** et **Wassila Thiaw**, experts du modèle Eta au NCEP (Maryland) . Ils collaborent avec Aïda Diongue Niang pour la validation du modèle sur le Sénégal et avec la DMN du Sénégal pour l'implémentation durant l'année 2005 d'une version opérationnelle du modèle Eta.

Durée du projet: 30 mois

II-5-2-2 Chronogramme

Temps	Travail
0 – 6 mois oct. 2004-mars 2005	Etude de processus et de cas de convection pré-AMMA Définition des configurations du modèle opérationnel (domaines, résolution, topographie, ...)
7 - 12 mois avril 2005 –sept. 2005	Implémentation des codes sources du modèle opérationnel et des logiciels pour le tracé
13-18 mois oct. 2005- mars 2006	Mise en œuvre de la chaîne opérationnelle et tests
19-24 mois avril 2006-sept.2006	Validation du modèle opérationnel durant la phase d’observations spécifiques d’AMMA Mise à disposition des produits pour les autres groupes.
25-30 mois oct. 2006-mars 2007	Etude de processus et de cas de convection observés durant AMMA

II-5-2-3 Références bibliographiques

Diongue A., Lafore J.-P, Redelsperger J.-L. and Roca R., 2001: "Numerical study of a sahelian synoptic weather system: Initiation and mature stage of convection and its interactions with the large scale dynamics", *Quart. J. R. Met. Soc.*, **128**, 1899-1927.

Diongue A., D.J. Parker, C.D. Thorncroft, R. Dumelow et A. M. Tompkins, 2002b. The JET2000 experiment : mesoscale structures, diurnal cycle and NWP issues. *Proceedings of the 25th Conference on hurricanes and tropical meteorology*, 29 Avril-3Mai, San Diego, Californie, pp391-392.

Diop, M., Gueremy, J.F. and J. P Ceron; 2000; Simulation of an African squall line; Sensitivity to the parametrisation of the land-surface and convection; in WMO Tropical Meteorology Research Programme Report Series TMRP No 63, pp189-191.

Slingo, J.M., M. Blackburn, A.K. Betts, R. Brugge, K. Hodges, B.J. Hoskins, M.J. Miller, L. Steenman-Clark and J. Thuburn, 1994: Mean climate and transience in the tropics of the UGAMP GCM: Sensitivity to convective parameterisation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **120**, 881-922.

Thorncroft C.D., Parker D. J., Burton R.R., Diop M., Ayers H.J., Barjat H., Devereau S., Diongue A., Dumelow R., Kindred D.R., Price N.M., Salouim M, Taylor C.M.,Tompkins A.M., 2003: “The

JET2000 project: Aircraft Observations of the African Easterly Jet and African Easterly Waves”, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **84**, 337-351.

Acronymes

ALADIN	Modèle de prévision à Aire Limitée de Météo-France
AMMA	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
ARPEGE	Action Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ASECNA	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar
CEPMET	Centre Européen des prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
DMN	Direction de la Météorologie Nationale
EGS	European Geophysical Society (Société Européenne de Géophysique) ETA
	Modèle opérationnel à aire limitée de NCEP
ERA-40	ECMWF (CEPMET en français) Re-Analyses for 40 years
GMAP	Groupe de Modélisation pour l'Assimilation et la Prévision
IRI	International Research Institut
	(institut de recherche international basé a New-York)
LA	Laboratoire d'Aérodynamique, Toulouse
LPASF	Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang
Méso-NH	Modèle à Méso-échelle Non-Hydrostatique développé par le CNRM et le Laboratoire d'Aérodynamique
MM5	Modèle à mésoéchelle développé à l'université de l'Etat de Pennsylvanie et au NCAR
NCAR	National Center for Atmospheric Research
	(Centre national américain pour la recherche atmosphérique)
NCEP	National Center for Environmental Prediction
	(Centre national américain pour les prévisions environnementales)
UK Met Office	Service Météorologique Royaume-Uni

II-5-2-4 Budget

Désignation	Nombre	Total (CFA)
<u>Equipement</u>		
Serveur pour tourner le modèle opérationnel	1	8 000 000
Serveur d'archivage de données PCs	1	12 000 000
Imprimante couleur HP	4	3 000 000
Consommables	2	400 000
		500 000
<u>Visite</u>	1	2 700 000
Expert du centre donateur du modèle pour sa mise en place au Sénégal (billet + 15 jours de <i>per diem</i>)		
Bourses d'étudiants (6mois) Informatique et Physique de l'atmosphère 150 000 par mois	2	1 800 000
Conférences / ateliers AMMA (billet+ une semaine de <i>per diem</i>)	2	2 000 000
EGS (billet + une semaine de <i>per diem</i>)	2	2 000 000
<u>Publication</u> (un article)	1	1 200 000
115 USD par page (20 pages)		
<u>Total</u> (CFA)		33 600 000

II-5-3 PREVISION SAISONNIERE

II-5-3-1 Problématique

La région de mousson ouest africaine est caractérisée par une variabilité inter-annuelle très marquée des pluies (e.g Rowell *et al*, 1995) et plusieurs études ont été entreprises pour comprendre cette variabilité (e.g. Lamb, 1978 ; Fontaine et Janicot, 1992 ; Folland, 1986 ; Ndiaye *et al*, 1999). La région sahélienne limitée par le Sahara au nord et la zone guinéenne au sud est particulièrement vulnérable à de telles variabilités et a souffert de sévères sécheresses qui ont eu des impacts socio-économiques dévastateurs. En effet, l'agriculture et le pastoralisme qui constituent les principales activités des pays sahéliens sont essentiellement tributaires des pluies. Par ailleurs, plusieurs maladies dans la sous région apparaissent avec l'installation de la saison pluvieuse. Ainsi toute variabilité des pluies affecte les ressources en eau, les disponibilités en nourriture et la santé des populations . De ce fait, il y a un besoin urgent d'améliorer notre capacité à élaborer des prévisions à l'échelle saisonnière.

La prévision saisonnière des précipitations au Sahel a fait l'objet de plusieurs études (e.g. Hastenrath, 1984, 1990, Lamb 1978, Ward 1998, Thiaw *et al*, 1999) et a abouti à des applications de modèles de prévision statistique en temps réel notamment au sein de l'ACMAD. Cependant, ces prévisions se basent sur des méthodes statistiques et dynamiques qui mettent l'accent sur la pluie accumulée durant la saison en donnant une idée sur la tendance du cumul saisonnier des pluies par rapport à la normale et sur de vastes zones. Cela est certes utile pour certaines études mais beaucoup d'applications, notamment l'agriculture, nécessitent des informations à une échelle spatiale plus fine et à l'échelle intra-saisonnière.

Pour passer à une échelle spatiale plus fine, des techniques de mise à l'échelle ou « downscaling » sont souvent utilisés en tenant compte des données locales. Il s'agit d'incorporer les observations locales aux prévisions dynamiques issues des modèles de circulation générale. Cette méthode a donné des résultats encourageants dans le cadre du projet CLIMAG de l'ACMAD (Ndiaye *et al*, 2001).

A l'échelle intra-saisonnière les demandes des utilisateurs concernent généralement les occurrences de périodes sèches (ou pauses pluviométriques) et l'installation de la mousson. Il faut noter que cela revêt une importance particulière pour beaucoup d'applications, notamment pour l'agriculture, par rapport à la planification des activités : date de semis, stockage de grains, etc. Très peu d'études concernent l'installation de la mousson. Des travaux récents ont montré que l'installation de la mousson dans la zone sahélienne s'opère par un brusque décalage du maximum de précipitations des régions guinéennes vers les régions sahéliennes (*e.g.* Sultan et Janicot, 2000). Les causes de ce brusque décalage qui a lieu en moyenne à la fin du mois de juin ne sont pas encore connues. Vu le bénéfice que beaucoup d'applications peuvent tirer de la prédiction de l'installation de la mousson et des pauses pluviométriques, il est urgent d'améliorer notre connaissance des processus qui les déterminent. Il faut noter que la prédiction de la pluie par les modèles de circulation générale reste encore un véritable challenge, pas uniquement en terme de quantité de pluie mais également en terme spatio-temporel.

II-5-3-2 Buts

Les principaux buts recherchés consistent à :

- Améliorer notre compréhension du cycle saisonnier de la mousson, particulièrement les processus physiques et dynamiques qui déterminent l'installation de la mousson,
- Comprendre la variabilité intrasaisonnière, notamment les mécanismes qui gouvernent les occurrences des pauses pluviométriques,
- Fournir, aux potentiels utilisateurs des prévisions saisonnières, des informations à une échelle spatiale plus fine en tenant compte des spécificités locales,
- Améliorer les modèles statistiques basées sur les TSM en y intégrant des prédicteurs dynamiques

II-5-3-3 Objectifs spécifiques :

Les principaux objectifs à atteindre sont listés ci-dessous :

- Etudier les mécanismes qui gouvernent l'installation de la mousson, étudier la variabilité interannuelle et la prévisibilité de l'installation de la mousson

- Etudier la prédictibilité de l'installation de la mousson et sa variabilité interannuelle, en utilisant les prévisions saisonnières issues des modèles dynamiques de circulation générale,
- Etudier, à l'échelle intrasaisonnière, des occurrences de pauses pluviométriques et essayer d'établir un schéma de prévision en rapport avec la variabilité intrasaisonnière de la dynamique de la mousson,
- Elaborer des prévisions saisonnières à échelle fine en tenant compte des observations atmosphériques, de la topographie et de l'environnement,
- Elaborer des modèles de prévisions statistiques stables et fiables avec une bonne variance expliquée
- Maintenir une page Web avec des prévisions saisonnières opérationnelles,
- Evaluer des prévisions saisonnières avec les observations de AMMA.

II-5-3-4 Outils et méthodologies

Pour étudier l'**installation de la mousson** sur l'Afrique de l'ouest, nous utiliserons en premier lieu les observations et les ré-analyses ERA-40 pour mieux comprendre les mécanismes qui la gouvernent et étudier sa variabilité interannuelle. En second lieu, nous étudierons la capacité des modèles dynamiques à prévoir l'installation de la mousson en utilisant les produits DEMETER. DEMETER est un projet européen qui a pour but de développer un système de prévisions d'ensemble à l'échelle saisonnières. Les sorties de DEMETER, disponibles pour une période d'au moins 30 ans, seront évaluées avec les ré-analyses ERA-40 (1957-2001). Ensuite nous utiliserons les sorties des modèles de circulation générale pour prévoir l'installation de la mousson. Il faut noter que la prédiction de la pluie par ces modèles reste encore un vrai challenge, pas seulement pour la quantité de pluie mais également pour la localisation et la période. Ainsi, une alternative est de considérer des indices permettant de définir l'installation de la mousson, basés sur des variables dynamiques.

Avec les données de ré-analyses, nous étudierons la **variabilité intrasaisonnière** de la mousson du point de vue dynamique. Ensuite, nous analyserons les données d'observation quotidiennes de pluie au niveau des stations du Sénégal pour étudier les **occurrences de périodes sèches** pendant la saison des pluies. Nous allons ainsi définir la notion de pause pluviométrique et de bonne saison pluvieuse selon les applications (agriculture, pastoralisme) en faisant la statistique des événements pour chaque station. Nous regarderons comment lier la variabilité intrasaisonnière de la mousson aux pauses pluviométriques.

Pour la **prévision à fine échelle spatiale**, nous utiliserons un modèle hybride, statistique et dynamique. Le modèle de circulation générale peut capter la circulation atmosphérique imposée par la configuration des prédicteurs (TSM) et les modèle de mise à l'échelle statistiques (*e.g.* EOF/CCA)

permettront de lier la variation des champs du modèle dynamique aux observations provenant des stations météorologiques du Sénégal. Nous utiliserons principalement les sorties de modèles disponibles et des outils statistiques tels que le programme CPT développé à l'IRI (<http://iri.columbia.edu/outreach/software/>).

Pour l'élaboration **du modèle statistique**, nous sélectionnerons des prédicteurs dynamiques en plus des prédicteurs basés sur les TSM. Ensuite, à partir des prédicteurs retenus, un modèle régional statistique sera élaboré à l'aide de la technique de régression linéaire multiple.

La campagne AMMA constituera une opportunité pour valider et éventuellement améliorer les méthodes de prévision qui seront proposés. Les résultats de cette étude seront disponibles sur une page Web qui sera mise à jour de manière opérationnelle durant la saison de mousson.

II-5-3-5 Résultats attendus

- Meilleure connaissance et compréhension de la mousson africaine,
- Evaluation de la capacité des modèles dynamiques à prédire l'installation de la mousson,
- Meilleure compréhension de la variabilité intrasaisonnière et des pauses pluviométriques,
- Prévision à échelle spatiale fine plus adaptée aux besoins,
- Mise à disposition des prévisions pour les applications : ressources en eau, agriculture, pastoralisme, santé,
- Meilleure accessibilité des produits météorologiques aux usagers,
- Présentation de résultats aux meetings,
- Publication de résultats.

II-5-4 PHASES AMMA CONCERNES : LOP, EOP

II-5-4-1 Personnes impliquées et leur contribution

- **Dr Aïda Diongue NIANG**, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale, travaillera sur l'installation de la mousson, la mise à disposition des produits aux autres chercheurs pour des besoins d'applications, le suivi de la page Web.
- **Ousmane NDIAYE**, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale, en fin de thèse à l'IRI travaillera sur la prévision saisonnière à fine échelle et sur l'évaluation des prévisions saisonnières avec les observations effectuées durant AMMA.

- **Dr Aïda Diongue Niang** et **Ousmane Ndiaye** vont encadrer un **étudiant en stage de DEA** pour travailler sur les pauses pluviométriques.
- **Dr Mariane Diop KANE**, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale, travaillera sur la prévision saisonnière à fine échelle.
- **Chérif DIOP**, Directeur par intérim de la Météorologie Nationale travaillera sur l'installation de la mousson et la prévision saisonnière à fine échelle.
- **Moussa Yoro THIAM**, ingénieur à l'ASECNA/AANS, travaillera sur l'élaboration d'un modèle statistique de prévision saisonnière
- **Dr Wassila THIAW**, Direction de la Météorologie Nationale, en détachement au Centre de Prédictions climatiques (NCEP) travaillera sur la variabilité intrasaisonnière et la variabilité interannuelle de l'installation de la mousson

Collaborations internationales

- **Dr Chris THORNCROFT**, Université d'Albany, collabore avec Dr Aïda Diongue Niang pour travailler sur l'installation de la mousson,
- **Dr Wassila THIAW**, au Centre de Prédictions Climatiques (NCEP) collabore pour l'étude des aspects concernant la variabilité interannuelle de l'installation de la mousson et la variabilité intrasaisonnière de la mousson.

Durée du projet : 24 mois

II-5-4-2 Chronogramme

Temps	Travail
0 - 6 mois avril 2005-sept. 2005	Traitement des observations. Etude sur les pauses pluviométriques,
7 – 12 mois oct. 2005-mars 2006	Comparaison ERA-40 et sorties DEMETER Préparation des outils pour la prévision saisonnière opérationnelle
13 - 18 mois avril 2006 –sept. 2006	Prévision à échelle fine, Prévision de l'installation de la mousson, Suivi du site Web pour les résultats,

	Mise à disposition des prévisions pour les applications.
19 -24 mois oct. 2006- mars 2007	Evaluation des prévisions. Publication de résultats

II-5-4-3 Références

Folland, C.K., Palmer, T.N., and Parker, D.E., 1986: Sahel rainfall and world wide sea temperatures, 1901-85. *Nature*, 320, 602-607.

Fontaine B. and Janicot S. , 1992 : Wind-field coherence and its variations over west Africa. *Journal of climate* vol5, 512-524.

Hastenrath, S., 1984: Interannual variability and annual cycle: Mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1097-1107.

Hastenrath, S., 1990: Decadal-scale changes of the circulation in the tropical Atlantic sector associated with Sahel drought. *Int. J. Climatol.*, 10, 459-472

Lamb, P.J., 1978: Large-scale tropical Atlantic surface circulation patterns associated with Subsaharan weather anomalies. *Tellus*, A30, 240-251.

Ndiaye O., N Ward and W. Thiaw, 1999 : “Diagnostic study of relationship between decadal and interannual rainy season variability in Senegal with SSTAs”, proceedings of the Workshop on the West African Monsoon Variability and Predictability (WAMAP). Geneva : WMO, 2000, 242 p..

Ndiaye O., Ward N., Thiaw W., 1999 : “Variabilité des précipitations interannuelles du Sénégal et téléconnections à l'échelle mensuelle avec le pacifique », *Pub. Ass. Int. Clim.*, 12, 298-305.

Rowell D.P., Folland C.K., Maskell, K. and Ward M.N., 1995: Variability of summer rainfall over Tropical North Africa (1906-92): Observations and modelling, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **121**, 669-704.

Sultan B. and Janicot S., 2000: Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3353-3356.

Thiaw, W. M., A. G. Barnston, and V. Kumar, 1999 : Predictions of African rainfall on the seasonal timescale. *J. Geophys. Res.*, Vol. **104**, No. D24, 31589-31597.

Ward, M.N., 1998: Diagnosis and short lead-time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at Inerannual and Multidecadal timescales. *J. Climate*, 11, 3167-3191.

Acronymes

AMMA	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
ACMAD	African Centre of Meteorological Applications for Development
AANS	Activités Aéronautiques Nationales du Sénégal
ASECNA	Agence pour la SECutité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar
CEPMMT	Centre Européen des prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CLIMAG	CLIMate Prediction and Agriculture, projet visant à l'utilisation des previsions climatiques par l'agriculture
CPT	Climate Predictability Tool, logiciel de prédictabilité climatique, développé à l'Institut International de Recherche
DEMETER	Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction
DMN	Direction de la Météorologie Nationale
ERA-40	ECMWF (CEPMMT en français) Re-Analyses for 40 years (40 années)
IRI	International Research Institut (institut de recherché international basé a New-York)
LPASF	Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang
NCEP	National Center for Environmental Prediction (Centre Américain pour les prévisions environnementales)
PRESAO	PREvision Saisonnière en Afrique de l'Ouest
TSM	Température de Surface de la Mer
EOF/CCA	Empirical Orthogonal Function/ Canonical Correlation Analysis

II-5-4-4 Budget

Désignation	Nombre	Total (CFA)
<u>Equipement</u>		
PCs	2	3 000 000
Imprimante couleur HP	1	200 000
Consommables		400 000
Bourses d'étudiant (12mois)		
150 000 par mois	1	1 800 000
Conférences / ateliers		
AMMA	3	3 000 000
(billet+ une semaine de <i>per diem</i>)		
PRESAO	3	3 000 000
(billet + une semaine de <i>per diem</i>)		
Webmaster	1	400 000
Création et maintien de la page Web		
<u>Publication</u> (un article)	1	1 200 000
115 USD par page (20 pages)		
<u>Total</u> (CFA)		13 000 000

II-5-5 MODELISATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU SAHEL

II-5-5-1 Problématique

Le Sahel, est connu pour être une zone caractérisée par des interactions fortes entre le climat et les secteurs socio-économiques clés tels que les ressources en eau, l'agriculture, l'élevage.

Le climat du Sahel, et de l'Afrique de l'ouest de manière générale, est régi par la circulation de mousson. Le cycle saisonnier de la mousson, caractérisé par son déplacement méridional, et la variabilité interannuelle de la mousson contrôlent étroitement le cycle de l'eau. En effet, les pluies dans la région sahélienne varient à l'échelle saisonnière sur un transect méridional de 800 mm au sud à 350 mm au nord et sont caractérisées par une forte variabilité interannuelle à décennale. Cette région est particulièrement sensible à de telles variabilités qui ont contribué à fragiliser son économie. En outre des difficultés liées à la variabilité climatique, le Sahel connaît actuellement un taux de croissance démographique important qui s'accompagne d'une pression sur les écosystèmes naturels et la satisfaction des besoins primaires (nourriture, ressources en eau, ...) reste encore un challenge. Les perspectives annoncées de changement climatique (rapport d'évaluation du GIEC, 2001) pourraient rendre le Sahel encore plus vulnérable en termes de disponibilité des ressources en eau, de santé, d'agriculture, etc. Il est alors urgent d'évaluer les impacts du changement climatique sur la région sahélienne et de les communiquer aux populations et aux décideurs.

Les projections du climat futur sont issues de simulations réalisées à l'aide de modèles climatiques. Il faut noter que la circulation de mousson qui régit le climat de l'Afrique de l'ouest est un système couplé atmosphère – océan – surface continentale dont le cycle saisonnier et la variabilité ne sont pas toujours bien représentés dans les modèles climatiques (WAMP, Thorncroft *et al*, 2001). Une évaluation de la capacité des modèles climatiques à reproduire le climat sahélien actuel s'avère alors nécessaire pour une meilleure interprétation des simulations du climat futur. En outre, les produits issus de ces simulations réalisées avec des modèles de circulation générale (MCG) sont à une échelle spatiale qui n'est pas directement exploitable pour les études d'impact. Ainsi, des techniques de descente d'échelles ou « downscaling » sont généralement utilisées pour obtenir à une échelle plus fine les variables simulées par le MCG (e.g. Gaye *et al*, 2000). Cela peut être réalisé avec des modèles statistiques ou à l'aide de modèles climatiques à aire limitée. Ces modèles, forcés avec un MCG aux bords, ont une résolution plus fine (quelques dizaines de kilomètres pour les modèles à aire limitée contre 200-300 km en général pour les MCGs) et permettent de mieux prendre en compte les aspects locaux tels que la topographie, la végétation.

II-5-5-2 But

Le but de cette étude est de fournir, à partir des projections climatiques, des variables pertinentes à des échelles spatio-temporelles fines pour effectuer des études d'impact du changement climatique sur des secteurs socio-économiques clés (agriculture, santé, pastoralisme...). Les projections climatiques qui seront utilisées dans cette étude seront issues d'une part des simulations que nous ferons avec le modèle climatique régional RegCM3 et d'autre part des simulations de modèles globaux. Les objectifs définis ci-dessous permettront d'atteindre ce but.

II-5-5-3 Objectifs spécifiques

- Evaluer la capacité des modèles climatiques (globaux et régionaux) à représenter le climat actuel du Sahel (état moyen et variabilité) ,
- Construire et évaluer les scénarii de changements climatiques (issus de modèles globaux et régionaux) basés sur différents scénarios du GIEC d'émissions de gaz à effet de serre,
- Fournir les sorties de modèle (climat actuel et projections futures) à une échelle spatio-temporelle pertinente pour des études de vulnérabilité et d'adaptation aux effets de changements climatiques dans divers secteurs (agriculture, ressources en eau, zone côtière, santé,).

II-5-5-4 Outils et méthodologies

Dans ce projet d'étude des changements climatiques au Sahel, nous utiliserons les modèles de circulation générale (MCGs pour la suite) et le modèle climatique régional RegCM3.

Dans un premier temps, nous allons évaluer les scénarios de changement climatique produits par les MCGs sur le Sahel. Nous étudierons d'abord la variabilité des modèles sur une période de référence (1970-2000) en les comparant aux ré-analyses du CEPMMT et du NCEP. Ensuite nous évaluerons les changements futurs sur la période 2070-2100.

En second lieu, nous nous intéresserons aux projections du climat futur à fine échelle.

Ainsi le modèle RegCM3 sera forcé par un MCG pour réaliser des simulations climatiques régionales à haute résolution horizontale. RegCM3 est un modèle à aire limitée à haute résolution utilisant la coordonnée verticale sigma. Il comprend plusieurs paramétrisations physiques telles que le BATS

(Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme) pour le modèle de surface (Dickinson et al. 1993), le schéma de rayonnement provenant du modèle de circulation générale CCM3 (Community Climate Model), le schéma sous-maille SUBEX (Subgrid Explicite Moisture) pour les précipitations de grande échelle et les schémas de convection Grell (1993), Kuo (1974) et Betts-Miller (1982).

Actuellement, le modèle a été implémenté au LPASF et a été intégré du 1^{er} janvier 1993 au 31 décembre 2000 à travers toute l'Afrique de l'Ouest avec une résolution horizontale de 60 km et 14 niveaux sigma sur la verticale. Les conditions initiales et aux limites sont fournies par les réanalyses du NCEP (2.5° x 2.5°) et les données hebdomadaires de températures de surface de la mer par NOAA (1° x 1°). La paramétrisation convective est celle de Grell (1993) avec la fermeture de Fritsch and Chappell (1980). Il s'agira de compléter cette période d'intégration pour couvrir la période 1970-2000. Ensuite des simulations sur le climat futur seront réalisées en forçant le modèle régional avec un MCG.

Des méthodes statistiques de descente d'échelles seront également utilisées en combinant les champs issus des MCGs et les observations aux stations météorologiques. Pour ce travail, nous nous limiterons aux stations du Sénégal.

II-5-5-5 Résultats attendus

- Meilleure compréhension du climat sahélien et de sa variabilité,
- Mise à la disposition de variables pertinentes à des échelles spatio-temporelles appropriées pour le développement d'applications sectorielles,
- Renforcement des capacités nationales en modélisation du climat

II-5-6 PHASES DE AMMA CONCERNEES : LOP

II-5-6-1 Personnes impliquées et leur contribution

- **Bamba SYLLA**, étudiant en thèse au LPASF co-encadré par Amadou Gaye et Greg Jenkins, travaillera sur le modèle climatique régional RegCM3 et sur l'évaluation des MCGs.

- **Dr Amadou GAYE**, directeur du LPA, encadre Bamba Sylla pour l'utilisation du modèle RegCM3 et sur l'évaluation des MCG. Il travaillera sur le transfert des produits issus du modèle climatique régional RegCM3 aux utilisateurs.
- **Ousmane NDIAYE**, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale, en fin de thèse à l'IRI et **Dr Aïda Diongue NIANG**, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale travailleront sur l'évaluation des MCGs et sur les méthodes de descente d'échelles pour alimenter les études d'impacts. Ils travailleront également sur la mise à disposition des produits pour les applications.
- **Assane SENE**, ingénieur à la Direction de la Météorologie Nationale, travaillera sur l'évaluation des MCGs et sur le transfert des produits aux utilisateurs.

II-5-6-2 Collaboration internationale

Dr Greg JENKINS, expert du modèle RegCM3, enseignant chercheur à l'université de Howard (Washington D.C, Etats-Unis) collabore avec le LPA pour la modélisation climatique régionale avec le modèle RegCM3

Dr Filippo GIORGI, chercheur à ICTP/TWAS (Trieste, Italie), intervient dans le développement de RegCM. Il collabore dans la mise à disposition des mises à jour de RegCM.

Dr Wassila THIAW, chercheur à la Direction de la Météorologie Nationale, en détachement à NCEP (Maryland, Etats-Unis) collabore avec la DMN du Sénégal pour la validation et l'utilisation des scénarii climatiques produits par les MCGs du GIEC.

Durée du projet : 24 mois

II-5-6-3 Chronogramme

Temps	Travail
0 - 6 mois oct. 2004- mars 2005	Evaluation des MCGs sur la période de référence,
7 – 12 mois avril 2005- sept 2005	Evaluation des scénarii climatiques prévues par les MCGs
12-18 mois oct 2005- mars 2006	Mise à l'échelle des variables issues des MCGs avec des outils statistiques en utilisant des données observées sur le Sénégal
19- 24 mois avril 2006- sept 2006	Modélisation régionale climatique avec le modèle RegCM3.

II-5-6-4 Références bibliographiques

Betts, A. K. and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 693-709.

Dickinson, R., Henderson-Sellers, A. and Kennedy, P. (1993) : Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model, technical report, National Center for Atmospheric Research.

Fritsch, J. M., and C. F. Chappell, 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *Journal of Atmospheric Sciences*, **37**, 1722-1733.

Gaye, A. Th., S. Fongang, E. M. F. Dabo, E. Sambou, S. M. Sall, 2000: Downscaling Global Climate Models outputs to build Climate Change Scenarios in Senegal. *Word Res. Rev.*, Vol. **12**, N°2, pp223-236.

Grell, G., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 764-787.

Kuo, H.L.. 1974: Further Studies of the Parameterization of the Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*: Vol. **31**, pp. 1232–1240.

Thorncroft, C. D. et collègues, 2001: West African Monsoon Project. Final report. Dec. 1997 – Nov. 2000. A European Union Funded Project. pp 272.

Acronymes

CEPMMT Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyenne Terme

DMN Direction de la Météorologie Nationale

GIEC Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'évolution du Climat

ICTP International Centre for theoretical physics

LPASF Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang

MCG Modèles de Circulation Générale

NCEP National Center for Environmental Predictions

(Centre national américain pour les prévisions environnementales)

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

RegCM3 Regional Climate Model version 3

TWAS Third World Academy of Sciences

WAMP West African Monsson Project

II-5-6-5 Budget

	Nombre	Total (CFA)
<u>Equipement</u>		
PCs	2	3 000 000
Consommables		1 000 000
Communications		1 200 000
Bourses d'étudiant de 3^e cycle 150 000 par mois pendant 24 mois	2	3 600 000
Conférences / ateliers		
AMMA (billet+ une semaine de <i>per diem</i>)	3	3 000 000
Ateliers RegCM (billet + deux semaine de <i>per diem</i>)	4	6 000 000
<u>Publication</u> (un article) 115 USD par page (20 pages)	1	1 200 000
<u>Total</u> (CFA)		19 000 000

II-6 MODELISATION DE L'UPWELLING SENEGALO-MAURITANIEN

Personnes impliquées :

Bamol Ali SOW (PI) (LPA-SF/ESP/UCAD)

Bassirou DIAW (CRODT/ISRA)

Abdoulaye SARR (DMN/ASECNA-Dakar ; LPASF)

Salam SAWADOGO (LTI/ESP/UCAD)

Awa NIANG (LTI/ESP/UCAD)

II-6-1 INTRODUCTION

La région au large de la Mauritanie et du Sénégal est le siège d'un vaste upwelling côtier, qui affecte d'une manière importante les flux de chaleur et de vapeur d'eau entre l'océan et l'atmosphère d'où l'importance de l'étude détaillée de cet upwelling dans le cadre du programme AMMA. D'autre part, les sels nutritifs ramenés en surface sont à l'origine d'une forte production biologique. Comprendre la variabilité de ce système est donc important pour l'exploitation et la gestion des ressources halieutiques régionales. Nous proposons l'étude de cet upwelling par plusieurs mais indissociables approches qui reposent essentiellement sur (1) la modélisation numérique de la circulation des masses d'eaux, forcée par le vent et de leurs propriétés physiques, (2) la validation des résultats du modèle à l'aide d'images satellite à haute résolution de la concentration en chlorophylle et de diverses mesures *in situ* et (3) la classification et la prédiction du phénomène d'upwelling par des méthodes statistiques avancées.

Le but de ces études est d'établir le lien entre le dynamique de l'upwelling et les ressources halieutiques. . En effet des analyses conjointes de statistiques de pêche et de prévision de l'upwelling devraient pouvoir permettre à terme une prévision des ressources halieutiques.

Ce projet, qui fait appel à la modélisation, à la télédétection, à des analyses statistiques, et à des mesures *in situ*, sera réalisé en collaboration avec le Laboratoire d'Océanographie et du Climat – Expérimentation et Approche Numérique (LOCEAN, ex LODyC), le Laboratoire Interdisciplinaire en Sciences de l'Environnement (LISE), le programme de recherche sur les Interactions et Dynamiques Spatiales des Ressources Renouvelables dans les Ecosystèmes d'Upwelling (IDYLE) de l'IRD et le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS) avec lesquels des échanges et discussions scientifiques sont déjà engagées.

II-6-2 PROBLEMATIQUE

La façade maritime du Sénégal est alternativement soumise aux alizés de nord-est ou à la mousson de sud-ouest qui influencent fortement la circulation océanique locale. Le plateau continental, plus développé au Sud qu'au Nord du Cap Vert ajoute une particularité supplémentaire. Cet ensemble, du fait d'une dynamique bien connue (upwelling d'Ekman) est le siège de remontées d'eaux froides riches en sels nutritifs. Ces eaux interagissent fortement avec l'atmosphère dans le processus de la mousson. Elles constituent aussi l'amorce de la chaîne alimentaire et partant, de la principale activité économique (pêche) du pays.

L'écosystème d'upwelling est caractérisé par des taux de production primaire très importants grâce à l'apport soutenu de nutriments par la circulation verticale nécessaire à la croissance du phytoplancton. On peut mesurer l'intensité de l'activité biologique dans l'océan par des moyens optiques grâce à l'analyse de la *couleur de l'océan*. On relie les réflectances spectrales mesurées au niveau d'un capteur couleur de l'eau dans plusieurs canaux visibles, à la concentration en pigments chlorophylliens présents dans l'eau. Cette concentration permet d'estimer la croissance du phytoplancton grâce à des modèles biologiques (modèles de production primaire).

En revanche la zone d'upwelling constitue également un environnement dispersif : la dérive d'Ekman et surtout les transports de mésoéchelle sont capables de « balayer » rapidement le plancton animal hors de la zone côtière riche en plancton végétal. L'analyse des températures satellitales et des vents locaux suggère que les petites échelles du vent côtier et des courants au sud du Cap Vert sont responsables de la structure des masses d'eau locales et d'un processus de rétention favorable à la survie des larves de la sardinelle (Roy, 1998).

Néanmoins, les mécanismes exacts et la variabilité spatio-temporelle que de tels processus physiques imposent à l'écosystème sont encore mal connus. Le présent projet s'intéresse à la compréhension et à la modélisation de l'upwelling sénégal mauritanien. Il accorde une importance particulière à la circulation forcée par le vent, à l'analyse de la couleur de l'océan, cette dernière permettant de valider à petite échelle les résultats du modèle de circulation océanique et à la prédiction du phénomène. On utilisera pour cela l'exploitation conjointe de mesures *in situ* et satellitales et de résultats de modèles numériques.

II-6-3 LES OBJECTIFS GENERAUX

Pour mieux comprendre un tel ensemble, un des buts à atteindre en matière d'océanographie physique de cette région devrait passer par la mise au point d'un modèle de suivi environnemental de la façade maritime sénégal-mauritanienne pour une gestion pluridisciplinaire de la relation entre hydro-climat et ressource. Un modèle côtier océanique est donc aujourd'hui l'outil d'étude privilégié pour la simulation et la prévision des conditions en mer au niveau des côtes sénégal-mauritaniennes, L'utilisation conjointe de mesures in situ et de **données satellites permettra sa validation et son forçage.**

L'objectif général est d'accéder à un ensemble d'informations plus riche permettant de mieux caractériser les écosystèmes marins et de mieux comprendre leur rôle dans les flux océaniques et l'effet de leur variabilité sur celle des ressources marines vivantes.

II-6-4 LES OBJECTIFS SPECIFIQUES

L'étude des liens entre l'environnement et les ressources se focalise généralement sur la recherche de corrélations simples entre un facteur physique (température, vent...) et un paramètre biologique (captures...). Cette orientation est dictée par la nécessité pressante de vouloir prédire la pêche. Quel peut être l'effet d'un paramètre physique sur la dynamique des populations est une question pertinente.

L'objectif principal est de comprendre les variations du système physique et leur impact sur l'écosystème et les ressources halieutiques. Il s'agira de :

- Etudier en détail dans cette région les petites échelles du vent et des courants.
- Simuler de manière réaliste à partir d'un modèle régional à très haute résolution, la circulation forcée par le vent.
- Valider les résultats du modèle en comparant les solutions avec les observations et produits disponibles. On analysera en particulier les corrélations entre les courants du modèle et les cartes de chlorophylle dérivées de la couleur de l'océan.
- Analyser les sorties du modèle en utilisant des outils diagnostiques pour identifier puis quantifier les processus de rétention / dispersion et corrélérer les différents régimes aux modes de circulation.

- Comparer la réponse du modèle océanique aux divers forçages et quantifier les contrastes à l'aide des outils d'analyse.
- Elaborer une classification en zone d'upwelling en utilisant conjointement les données de chlorophylle A et de SST.
- Développer une méthode de prédiction du phénomène d'upwelling par l'utilisation de séries temporelles de cartes de vents et de SST.
- Relier la variabilité du vent aux problèmes de production et définir les stratégies de surveillance appropriées.

L'atteinte de ces objectifs permettra l'estimation de la sensibilité du modèle d'océan au forçage atmosphérique local et la détermination des processus dynamiques qui contrôlent la circulation, l'enrichissement nutritif et la rétention/dispersion dans la zone côtière sénégal-mauritanienne.

II-6-5 LES APPROCHES UTILISEES

II-6-5-1 Impact de la météorologie sur le système d'upwelling sénégal-mauritanien

Cette première partie de l'étude accorde une importance particulière aux échanges à l'interface océan-atmosphère, via l'exploitation conjointe de résultats de modèles numériques, de mesures *in situ* et satellitales.

II-6-5-1-1 Problématique

L'upwelling sénégalais est la partie sud du système des Canaries qui a les plus fortes connections avec la dynamique intertropicale atmosphérique. Les vents y sont favorables à l'upwelling entre décembre et juin et aspirent vers la surface des eaux froides qui viennent remplacer les eaux tropicales chaudes. En période d'été, ces eaux tropicales s'écoulent vers le nord jusqu'à Cap Blanc (20°N) grâce aux vents de mousson. Le vent local est donc le facteur dominant de la variabilité saisonnière de l'upwelling sénégalais mais aussi de sa variabilité interannuelle (Roy, 1989).

La topographie côtière produit des petites échelles de variabilité du vent. Une caractéristique de la dynamique côtière atmosphérique en zone d'upwelling est la production de vases d'expansion supercritiques en aval des caps ou autres structures orographiques marquées (Dorman et al. 2000). Cette accélération des vents entraîne des variations spatiales importantes dont l'impact au niveau océanique est mal déterminé. Malgré des progrès sensibles ces dernières années, la connaissance du

vent près de la côte ne semble toujours pas être assez précise car les simulations démontrent une sensibilité importante aux divers produits disponibles (Marchesiello et al, 2003).

II-6-5-1-2 Objectifs

L'objectif, dans cette partie du travail est l'utilisation du modèle d'océan côtier pour la simulation et la prévision des conditions en mer au niveau des côtes sénégal-mauritaniennes, sa validation et éventuellement son forçage utilisant des données satellites.

Les motivations ultimes de l'étude sont d'aboutir à une meilleure compréhension et caractérisation des processus intervenant dans la dynamique de l'upwelling sénégal-mauritanien, et donc à une amélioration de la prévision de sa variabilité spatio-temporelle assez importante pour les halieutes.

II-6-5-1-3 Méthodologies proposées

II-6-5-1-3-1 Le modèle d'océan côtier

Le modèle envisagé pour cette étude est ROMS (Regional Oceanic Modeling System). Il a été développé pour l'étude du système d'upwelling californien (Marchesiello et al., 2003), puis appliqué au système du Benguela (Penven et al., 2000) et enfin, à un stade plus préliminaire, aux systèmes du Pérou-Chili et des Canaries. Sa précision numérique, sa structure efficace de parallélisation et son traitement robuste des conditions de frontières ouvertes en font un outil puissant pour la haute résolution en océanographie régionale. Une technique d'emboîtement (AGRIF, Blayo et Debreu, 1999) est utilisée en complément des conditions de frontières ouvertes pour un raffinement local de résolution à plusieurs niveaux, sans perdre l'information des plus grandes échelles océaniques. La technique d'emboîtement utilisant jusqu'à quatre niveaux de grille a été validée sur le système californien (Penven et al, 2003) et appliquée avec succès sur les autres systèmes.

Notre étude se focalisera sur la partie sénégal-mauritanienne du système d'upwelling Nord-Atlantique, donc sa partie sud qui a les plus fortes connections avec la dynamique intertropicale atmosphérique et océanique. Une première configuration existe où l'on considère un sous-domaine emboîté (8 km de résolution) dans un domaine régional couvrant tout le système (24 km de résolution), lui-même forcé aux frontières pour inclure l'information de grande échelle. Il y a 32

niveaux de calcul sur la verticale et la résolution est intensifiée en surface pour paramétriser la couche de mélange et la pénétration du forçage. Le modèle forcé par des champs climatologiques a été intégré sur une période de 10 ans, une fois atteint un état de stabilité statistique après un spin-up de 2 ans.

Une analyse préliminaire montre que la solution est réaliste au niveau du cycle saisonnier et des formations de mésoéchelle (filaments d'eau froides, méandres et tourbillons). On peut facilement définir des niveaux de raffinement supérieurs, avec par exemple un troisième niveau autour de la Péninsule du Cap Vert (2 à 3 km de résolution) et un quatrième niveau au sud du Cap Vert (1 km de résolution). Ce dernier niveau détermine le coût de calcul du modèle à cause des pas de temps faibles que la haute résolution impose.

II-6-5-1-3-2 Le forçage

Ce modèle d'océan peut être forcé par différents types de produits de vent que l'on testera dans le cadre du projet.

II-6-5-1-3-2-1 Modèles basse résolution

Des produits de vent globaux synoptiques ou climatologiques sont proposés par les centres opérationnels de météorologie. Les plus connus sont les réanalyses du centre européen ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) et des centres américains NCEP (National Center for Environmental Prediction) et FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center). Ces vents présentent l'avantage d'une très bonne couverture spatiale et temporelle, donc couvrant les échelles synoptiques et même diurnes.

II-6-5-1-3-2-2 Modèles régionaux haute résolution

Les mêmes centres opérationnels de météorologie proposent des solutions hautes résolutions en emboîtant des domaines régionaux dans les modèles globaux. C'est le cas des modèles mésoéchelle ETA de NCEP, COAMPS de FNMOC et MM5 de PSU/NCAR. Ces modèles sont disponibles pour le public pour une utilisation régionale et permettent d'augmenter localement la résolution des produits globaux (downscaling).

II-6-5-1-3-2-3 Diffusiométrie satellitaire

Les diffusiomètres présentent une bonne alternative aux modèles en produisant une mesure directe avec une couverture globale. Les produits basse résolution de type ERS (1°) fournissent des données hebdomadaires sur une décennie. Des produits plus récents de type SeaWinds sur le satellite QuickSCAT permettent une approche plus fine (0.25°) capable de décrire les gradients côtiers dans les régions d'upwelling.

II-6-5-1-3-3 Les mesures

La région d'upwelling que nous voulons étudier est d'une importance capitale pour les échanges océan-atmosphère en fin de période de mousson (fin août, début septembre : absence d'upwelling). Il est nécessaire pour entreprendre un tel travail de recherche d'obtenir des mesures in situ permettant de suivre les variations environnementales (atmosphère, océan) qui peuvent conditionner localement l'upwelling côtier et/ou qui en constituent une conséquence.

II-6-5-1-3-3-1 Observations directes locales

Depuis une quarantaine d'années, sept stations de mesure de SST, SSS, sels nutritifs, sont installées et entretenues par le CRODT le long des côtes sénégalaises. Pour étudier le lien entre les fluctuations du vent et la variabilité de l'upwelling pour un suivi plus régulier de l'environnement côtier, il faudrait équiper ces stations d'appareils de mesure de vent (stations automatiques, anémomètres). Il faut une station météorologique complète sur la pointe des Almadies qui est *le point le plus à l'ouest du Sénégal* et qui sera ainsi la plus représentative des conditions océaniques.

En liaison avec le GCOS (Global Climate Observing System), un programme de recensement des stations côtières existantes et toujours maintenues, de récupération et de description de toutes les données disponibles est prévu. Ce travail est entamé dans le cadre d'EGEE au LAPA (Abidjan) et au Centre IRD de Bretagne (Brest) et donnera lieu à la réalisation d'une banque de données côtières qui sera rendue disponible à la communauté.

Différentes campagnes de mesure intéressent la zone située au large des côtes sénégalomauritanienne. Il est en effet prévu des campagnes de mesure françaises durant les trois années de l'EOP et en particulier pendant la SOP en 2006 (EGEE : composante océanographique d'AMMA

pour la France), américaines (US NOAA) et allemandes (Campagne Poseidon en février-mars 2005, pour des mesures biogéochimiques dans les régions d'upwelling nord ouest africaines, campagne Meteor dans le dome de Guinée en mai-juin 2006, IFM-German Geomar). Ces observations (mesures atmosphériques et océaniques) seront d'un grand intérêt pour le forçage et la validation du modèle d'océan côtier.

Des campagnes océanographiques seront organisées avec le N/O « ITAF DEME » du CRO-DT., entre Dakar et le Cap Vert. Ces campagnes permettront d'effectuer, en période de présence de l'upwelling et pendant la mousson (été boréal) des mesures et des profils de température, de salinité ainsi que des prélèvements de surface permettant d'analyser différents paramètres (salinité, sels nutritifs, chlorophylle...) indispensables pour valider le modèle, les produits disponibles et les images satellitaires (voir proposition V.2). Ces mesures seront obtenues à l'aide d'une sonde CTD (collaboration IRD), de sondes XBT, et via le déploiement éventuel de profileurs PROVOR du programme CORIOLIS/MERCATOR et de bouées dérivantes de surface de type SVP du programme CLIVAR/US (collaboration IRD et US/NOAA). Ces campagnes seront d'une durée approximative de 5 jours, et sont prévues pendant l'année 2006 (SOP du programme AMMA). Ces campagnes permettront également des mesures de paramètres atmosphériques nécessaires à la validation des études sur la couleur de l'océan (voir proposition suivante V.2)

Enfin, les mesures effectuées lors de diverses campagnes ou validations de transit de navires océanographiques ou marchands (campagnes PIRATA, lignes VOS -Voluntary Observing Ships-...) seront tant que possible collectées et utilisées dans le cadre du programme.

II-6-5-1-3-3-1 Produits globaux

La compilation de mesures in-situ faites notamment par les VOS (Voluntary Observing Ships) fournit des climatologies. Les données de COADS (Comprehensive Ocean Atmosphere Data System), notamment UWM/COADS cartographiées par da Silva et al. (1994) sont les plus utilisées.

Divers produits à l'échelle du bassin sont disponibles et serviront à l'analyse de la variabilité locale versus les conditions de grande échelle aux limites de la zone étudiée. On pourra utiliser ainsi les climatologies (et produits issus de mesures satellitaires) de température (TAOSTA/LEGOS, Reynolds...), de salinité (IRD et climatologie de Reverdin et al. /LODYC), de couche de mélange

(TAOSTA/LEGOS et LODYC), et de courant de surface (AVISO via Topex/Poseidon, Global Data Center de la NOAA, ...), et de couleur de la mer (voir également proposition V.2).

A noter en 2005 l'actualisation de la réanalyse MERCATOR sur les années 1992-2004 au 1/15°.

II-6-5-1-3-4 Les résultats attendus

Intensification et relaxation des upwellings, migrations, reproduction, recrutement se succèdent à un rythme annuel. Le court terme s'intéresse aux échelles de temps fines, de quelques heures à la quinzaine ou au mois. Ce pas de temps est celui pour lequel les pêcheurs interpellent les scientifiques. La question posée à ces derniers est alors de développer des modèles prédictifs de la disponibilité des ressources.

- Suivi environnemental opérationnel à long terme de la Zone Maritime Economique sénégal-mauritanienne.
- Eléments de compréhension pour les halieutes dans la relation Pêche et Hydro-climat.
- Compréhension des stratégies de reproduction de certaines espèces.
- Identification des processus physiques qui permettent la mise en place de telles stratégies.
- Analyse statistique comme base de travail pour la prévision de variabilité spatio-temporelle du système sénégalais.

Bibliographie

Marchesiello, P., J. C. Mc Williams and A. Shchepetkin, 2003: Equilibrium structure and dynamics of the californian current system. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 753-783.

Nykjaer, L. and Van Camp, 1994 : Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991. *J. Geophys. Res.*, 99, n° C7, 14197-14207.

Roy, C. 1989 : Fluctuations des vents et variabilité de l'upwelling devant les côtes du Sénégal. *Oceanologica Acta*, 12, 4, 361-369.

Penven, P., C. Roy, G. B. Brundrit, A. Colin de Verdière, P. Fréon, A. S. Johnson, J. R. E. Lutjeharms and F. A. Shillington, 2001: A regional hydrodynamique model of the Southern Benguela upwelling, *S. Afr. J. Sci.*, 9, 472-475.

II-6-5-2 Cartographie satellitaire & Couleur de l'Océan

II-6-5-2-1 Introduction

L'observation du contenu de l'océan sur une échelle spatio-temporelle globale est hors de portée des méthodes traditionnelles de mesure *in situ*. C'est pourquoi, depuis une vingtaine d'années, on se sert des appareils de mesure embarqués sur satellite pour surveiller l'océan superficiel sur une échelle globale. Ces appareils peuvent fournir des indicateurs utiles aux modèles physiques et biologiques intervenant dans la modélisation des processus océaniques: la température, le vent, les précipitations, les quantités de gaz et d'aérosols présents dans l'atmosphère, des indices de présence de phytoplancton etc...

Durant cette étude, nous nous focaliserons sur l'analyse des mesures de la couleur de l'océan, fournies par des capteurs embarqués sur satellite. La production de champs de couleur de l'océan corrigés de l'effet de l'atmosphère effectués dans le cadre du programme AMMA ouvre des perspectives très intéressantes pour la compréhension et la gestion des ressources halieutiques du Sénégal

II-6-5-2-2 Problématique

L'analyse de la couleur de l'océan permet de déterminer la composition minérale et biologique des premières profondeurs sous-marines par des moyens optiques. Cette analyse utilise le plus souvent les mesures de réflectances marines. Au large, les propriétés optiques des océans dépendent essentiellement de celles de l'eau de mer, du phytoplancton et de ses détritiques associés; aussi pour de telles eaux, la couleur de l'océan permet de calculer la quantité de phytoplancton présente dans l'eau. Le phytoplancton est optiquement relié à la mesure radiométrique par ses pigments photo--actifs, dont la Chlorophylle A est le principal. Une chaîne de traitement couleur de l'océan calcule donc la concentration en Chlorophylle A présente dans la couche de mélange de l'océan à partir des mesures de réflectances marines, et fournit une image globale de cette concentration sur la planète. De telles mesures permettent d'estimer la biomasse et la croissance du phytoplancton grâce à des modèles biologiques (modèles de production primaire), qui calculent la façon dont le phytoplancton croît en pompant certains gaz dans l'atmosphère (notamment le dioxyde de carbone).

Les mesures sont obtenues par des radiomètres (POLDER, SeaWiFS, MERIS, MODIS,...) embarqués sur satellites et sont le résultat de l'interaction du rayonnement solaire avec les composants de l'atmosphère et de l'océan (couplage océan - atmosphère). Une bonne *correction atmosphérique* est nécessaire à l'obtention des réflectances marines. On passe donc en général par une étape d'analyse du signal qui permet déterminer quel modèle d'atmosphère va être utilisé pour réaliser la correction atmosphérique. Les corrections atmosphériques actuelles ne tiennent pas compte de toute la variabilité des aérosols atmosphériques (on considère une atmosphère moyenne) et les réflectances marines obtenues ne permettent pas d'obtenir une bonne estimation des pigments chlorophylliens. Les mesures satellites au large du Sénégal sont le plus souvent perturbées par la présence d'aérosols de poussières (poussières sahariennes) dans l'atmosphère qui causent d'importants problèmes lors des corrections atmosphériques et par les phénomènes d'upwelling sur lesquels croissent des écosystèmes dont l'influence sur les propriétés optiques de l'océan est mal connue.

II-6-5-2-3 Les objectifs

Nous proposons d'élaborer une cartographie des aérosols atmosphériques en utilisant des techniques de statistiques avancées qui permettent de prendre en compte l'aspect multidimensionnel et les effets non linéaires. L'objectif est l'amélioration des chaînes de traitement, dédiées à la correction atmosphérique et la restitution de champs de chlorophylle_A.

La méthode de typologie des aérosols atmosphériques développée, pourrait être très utile pour le Groupe thématique « Aérosols- chimie- processus radiatifs ».

Les champs de chlorophylle_A dérivés de ces méthodes peuvent être utilisées pour la validation du modèle côtier océanique utilisé dans la première partie de l'étude (paragraphe V.1).

L'objectif général de ces recherches est de bâtir une série de données illustrant la variabilité des écosystèmes marins au large du Sénégal, dans une région de pêche intense où l'analyse des images satellites est rendu difficile par l'abondance des aérosols d'origine saharienne.

II-6-5-2-4 Méthodologies proposées

La télédétection satellitaire est un domaine en pleine expansion qui pose aux physiciens et aux modélisateurs un grand nombre de problèmes qui sont de nature statistique. Le perfectionnement

des capteurs, en particulier l'augmentation du nombre et de la résolution des bandes spectrales mesurées fait que la quantité d'information potentielle recueillie s'accroît considérablement au fur et à mesure des générations d'appareils. Un des enjeux de cette évolution technique est d'arriver à exploiter toute cette information avec le maximum d'efficacité. L'exploitation est généralement longue et s'effectue la plupart du temps d'une manière sub-optimale en considérant une variable à la fois.

Elle peut être améliorée si l'on a recours aux nouvelles techniques de modélisation utilisées en apprentissage numérique. Le fait que les mesures concernées soient numériques et disponibles en quantités gigantesques rend ce domaine particulièrement adapté à la modélisation neuronale. Cependant, malgré le nombre des données acquises par les satellites, les mesures qui permettraient de faire appel aux méthodes d'apprentissage supervisé sont en nombre très limitées. Il s'agit en général de mesures *in situ*, qui nécessitent un équipement complexe et des analyses très longues à effectuer. L'enjeu est donc bien d'analyser les mesures de télédétection d'une manière non supervisée et de reconnaître les groupements effectués à l'aide de toute l'information que l'on peut recueillir par ailleurs.

Cartographie satellitaire

D'une manière générale, la cartographie satellitaire cherche à fusionner un ensemble gigantesque d'observations multidimensionnelles fournies par un satellite et la connaissance des phénomènes sous-jacents qu'en ont les experts. En réalité, l'ensemble de l'expertise disponible ne prend souvent en compte qu'une partie de la complexité des phénomènes étudiés alors que les observations représentent une mesure plus complète de la réalité.

Il convient de prendre en compte un grand nombre de variables physiques non observables ou qui n'ont pas été mesurées (les variables cachées). L'action de ces variables est prise en compte par l'élaboration de modèles théoriques (et/ou un ensemble de règles empiriques) qui permettent, par simulation, d'établir de grandes bases de données multidimensionnelles. Le rapprochement des deux bases de données celle contenant la "connaissance théorique" et celle des observations satellitaires peut permettre, si l'on trouve une méthode pour affecter à une observation spatiale une "connaissance théorique" de proposer une cartographie des variables cachées (par exemple type d'aérosols, épaisseurs optiques, type d'eaux,...).

Le premier volet de ce projet vise à mettre au point une telle méthode de cartographie qui utilise pour la mise en coïncidence observation – modèle, un ensemble de connaissances liées à la physique de l’atmosphère et aux statistiques. Il s’agit de résoudre un problème inverse pour lequel on possède beaucoup d’observations, mais quasiment pas de données pour superviser l’apprentissage. On va donc effectuer la résolution du problème inverse en deux phases : une phase de classification non supervisée pour trouver les groupements cohérents suivie d’une phase d’introduction d’expertise pour achever l’inversion recherchée. L’originalité de l’approche employée ici tient à la manière dont l’expertise qui est contenue dans les modèles théoriques d’aérosols proposés par les physiciens est utilisée pour effectuer l’inversion. On utilisera l’un des modèles le plus connu en apprentissage non supervisé, le modèle neuronal des cartes auto organisatrices (Self Organizing Maps SOM), conçu initialement pour l’organisation et la visualisation des grandes bases de données. Une première série d’algorithmes de ce type ont été proposés [1], [2] sur le traitement des observations des capteurs satellitaires de couleur de l’océan (POLDER et SeaWiFS). Les performances obtenues ont permis de montrer qu’il était possible de faire apparaître les principales caractéristiques optiques de l’atmosphère (typologie et épaisseur optique des aérosols).

Notre approche multidimensionnelle serait particulièrement utile pour le traitement des données fournies par les radiomètres de la nouvelle génération (POLDER II, MERIS, MODIS...) qui disposent de plus de canaux. D’autre part, les dimensions de l’application traitée (taille des bases de données, dimension des observations, dimension des cartes auto organisatrices) vont permettre de juger de la puissance de calcul mise à la disposition des modélisateurs par les cartes auto organisatrices.

La calibration de nos algorithmes nécessitera des mesures in situ de paramètres atmosphériques (épaisseurs optiques des aérosols et reflectances) et océaniques (chlorophylle et reflectances marines) qui seront acquises lors des campagnes de mesures de ITAF DEME (voir proposition V.1).

II-6-5-2-5 Les résultats attendus

- Aide à l’amélioration des chaînes de traitement couleur de l’océan
- Restitution des champs de chlorophylle A sur une échelle globale.
- Meilleure connaissance de la variabilité spatio-temporelle de l’upwelling.
- Aide à la compréhension et à la gestion des ressources halieutiques

- Typologie des aérosols atmosphériques et leur épaisseur optique.
- Suivi des poussières désertiques.
- Utilisation des résultats dans d'autres études : propriétés optiques des aérosols, santé (distribution spatio-temporelle des aérosols)...

II-6-5-3 Classification et prédiction du phénomène d'upwelling

II-6-5-3-1 Introduction & Problématique

Un upwelling se caractérise, à première vue, par une baisse de la température de l'eau, qui est due à cette remontée des eaux profondes (froides). Celles-ci, riches en sels nutritifs, sont ensuite responsables du développement du phytoplancton. En effet, pour se développer, ces micro-organismes ont besoin de lumière, d'eau, de CO₂ et de nutriments. C'est bien sûr ce dernier élément qui agira comme facteur limitant. On comprend donc pourquoi les zones d'upwelling, riches en sels minéraux, sont des zones avec une production primaire élevée.

Une manière de caractériser la position d'un upwelling consisterait donc à déterminer les régions riches en chlorophylle et dont la SST reste faible. Ces deux paramètres, très utilisés en télédétection dans le domaine océanique, permettent de faire le lien entre un enrichissement local, dont la SST est un bon témoin pour les upwellings côtiers, et le résultat de cet enrichissement en terme de production biologique, tel que mis en évidence par la chlorophylle de surface. Ces relations, de type enrichissement/biomasse, peuvent montrer des corrélations parfois très fortes entre les deux paramètres, mais ne peuvent être extrapolées spatialement sans prendre en compte la structuration locale des upwellings.

D'autre part l'apparition du phénomène d'upwelling dépend de plusieurs paramètres, et en particulier du vent. Elle devrait pouvoir donc être prédite en prenant en compte l'aspect temporel.

II-6-5-3-2 Objectif généraux

La première partie de cette étude consistera donc à localiser les zones d'upwelling par une méthode de classification automatique utilisant conjointement les données de Chlorophylle A et SST.

Nous proposons dans la deuxième partie de développer une méthodologie neuronale de prédiction du phénomène d'upwelling, qui se fera par une modélisation des séries temporelles de cartes de vents.

II-6-5-3-3 Méthodologies proposées

La méthodologie neuronale des cartes auto organisatrices sera utiliser pour proposer une classification de la zone d'upwelling.

Dans un premier temps nous projetons d'étudier les données de SST, fournies par MétéoSat et le capteur AVHRR des satellites NOAA et celles de chlorophylle fournies par les chaînes de traitement des capteurs couleur de l'océan (SeaWifs, MERIS,...). Ces deux types de données peuvent être des moyennes hebdomadaire ou mensuelle. Une autre approche du problème pourrait être de travailler sur des images quotidiennes. En effet, lors d'une remontée des eaux profondes, l'augmentation de la production primaire peut prendre plusieurs jours pour se mettre en place. Travailler sur des images quotidiennes permettrait de suivre plus facilement la dynamique de l'upwelling. Par la suite nous pourrions utiliser les champs de chlorophylle obtenus par notre méthode neuronale (section V.2).

Nous chercherons à mettre en évidence les zones majeures de l'upwelling (upwelling côtier, ou non côtier), et à déterminer les zones correspondant à l'extension générale de l'upwelling et celles correspondant aux régions sources d'upwelling. Il serait intéressant aussi de réduire la zone d'étude afin d'étudier plus en détail les régions d'upwelling localisées. La méthode utilisée étant générale, nous pourrions l'appliquer à d'autres régions de l'océan.

Pour la prédiction de l'upwelling, nous proposons de développer une méthodologie neuronale de prédiction, utilisant les réseaux IIR (Impulse Infinite Response) pour la modélisation des séries temporelles de vent. Nous rechercherons dans un premier temps le nombre optimal de jours (pas de temps) qui permet une meilleure prévision. D'autre part, nous testerons différentes hypothèses concernant les grandeurs significatives intervenant dans l'upwelling : corrélation du vent par rapport à l'élévation annuelle de température, à l'élévation journalière de température, à l'élévation par rapport à la SST moyenne.

Les divers produits océaniques disponibles (voir proposition V.1) seront utilisés pour valider les algorithmes de classification et de prédiction.

II-6-5-3-4 Les résultats attendus

- Localisation des zones d'upwelling
- Méthode de Prédiction de l'apparition de l'upwelling

Références bibliographiques

- [1] A.Niang, L.Gross, C.Moulin, F.Badran, S.Thiria: "Automatic Neural Classification of Ocean Colour Reflectance Spectra at the Top of the Atmosphere with Introduction of Expert Knowledge." Rem. Sens. Envir. Vol. 86, No. 2, p. 257-271 2003.
- [2] A.Niang, S.Thiria, F.Badran, M.Yaccoub, C.Moulin, M.Crepon. "Clustering and Classification Based on Expert Knowledge Propagation Using Probabilistic Self-Organizing Map (PRSOM): Application to the Classification of Satellite Ocean Color TOA Observations". IEEE International Symposium On Computational Intelligence For Measurement Systems And Applications, 29-31 July 2003. Lugano, Switzerland.
- [3] Thiria S., M. Yacoub, F. Badran, C. Moulin, A. Niang: "Analysis of an Aerosol event over the Mediterranean Sea with the use of a neural network method for classifying TOA Ocean Color signal", In American Meteorological Society 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science, 9-13 Février 2003, Long Beach, CA, USA.
- [4] A. Niang, L. Gross, C. Moulin, F. Badran, S. Thiria. 'Classification automatique neuronale de réflectances satellitaires (Niveau L1B) de la couleur de l'Océan'. Revue "Télédétection" (Éditions scientifiques GB, Contemporary Publishing International) vol.3, no 5, p. 337-364. (2003).
- [5] YACOUB, M D FRAYSSINET, F BADRAN, S THIRIA: 2000 "Classification based on Expert knowledge propagation using Probabilistic Self-Organizing Map: application to geophysics" in Data Analysis : scientific modeling and practical application Springer-Verlag (Studies in classification, data Analysis, and knowledge organization).
- [6] LEBBAH, CHABANON C., M., BADRAN F., THIRIA S (2002) : Categorical Topological Map. Proc of ICANN 2002, Madrid, August 27-30 , springer Verlag.
- [7] Yacoub, M Ndeye Niang, F. Badran & S. Thiria (2001): A New Hierarchical Clustering Method using Topological Map. ASMDA 2001 (Applied Stochastic Models and Data Analysis)

[8] F. ANOUAR, F. BADRAN et S. THIRIA, 1997: " Self Organized Map, A Probabilistic Approach", proceedings of the Workshop on Self-Organizing Maps. Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, June 4-6 1997.

II-6-6 COLLABORATIONS

Ce projet ainsi présenté fédère des compétences nationale et internationale à travers une collaboration scientifique entre chercheurs des laboratoires du nord et du sud.

II-6-6-1 Collaboration Nationale

- Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang - LPASF/ESP/UCAD – Sénégal.
Bamol Ali Sow : Modélisation de la circulation forcée par le vent à l'aide du modèle ROMS.
- Laboratoire de Traitement de l'Information – LTI/ESP/UCAD – Sénégal
Awa Niang : Modélisation & Techniques statistiques avancées.
Encadrement d'étudiants DEA/Master, éventuellement Doctorat.
Salam Sawadogo : Modélisation Analyse de la couleur de l'eau par techniques statistiques.
Encadrement d'étudiants DEA/Master, éventuellement Doctorat.
- Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal – DMN – Sénégal.
Abdoulaye Sarr : Modélisation atmosphérique à l'aide du modèle MM5.
- Centre de Recherches Océanographiques de Dakar – Thiaroye – CRODT/ISRA – Sénégal
Bassirou Diaw : Campagnes de mesure en mer à l'aide du bateau ITAF DEME.

II-6-6-2 Collaboration Internationale

- Programme des Interactions et Dynamiques Spatiales des Ressources Renouvelables dans les Ecosystèmes d'Upwelling – IDYLE/IRD- UR 097 – France.
- Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS – UMR 025 – France
[**Bernard Bourles & Patrick Marchesiello**]
- Laboratoire d'Océanographie et du Climat – Expérimentation et Approche Numérique. (LOCEAN) - Institut Pierre Simon Laplace - UMR 7617 CNRS/IRD/UPMC/MNHN – France.
[**Sylvie Thiria**]

- Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences de l'Environnement - LISE/ELICO/UMR CNRS 8013 [**Richard Santer**]

II-6-7 Chronogramme

Octobre 2004 – janvier 2005 (6 mois)

Configuration du modèle d'océan côtier ROMS (domaine, résolution) et Implémentation (codes, sources, tests).

Février 2005 – Juillet 2005 (6 mois)

- Estimation de la qualité des différents produits de vent disponibles (LOP : produits satellitaires, observations directes locale et globale, sorties de modèles basse et haute résolution).
- Développement des méthodes de classification neuronale (cartographie des aérosols).

Août 2005 – Janvier 2006 (6 mois)

- Premiers traitements des données EOP.
- Restitution des champs de chlorophylle A.
- Classification des zones d'upwelling.
- Une campagne de mesures ITAF DEME.

Février 2006 – Juillet 2006 (6 mois)

- Traitement des données EOP.
- Participation à la SOP3.
- Forçage du modèle par les différents produits de vent disponibles.
- Deux campagnes de mesures ITAF DEME.
- Une Campagne de mesures ITAF DEME prise en charge partiel par API France.
- Installation de la station Meteo à la pointe des almadies.

Août 2006 – Janvier 2007 (6 mois)

- Traitement des données EOP.
- Validation des résultats du modèle par les observations in-situ et satellitaires.
- Développement des méthodes de prédiction de l'upwelling.
- Deux campagnes de mesures ITAF DEME prises en charge partiel par API France.

Février 2007 – Juillet 2007 (6 mois)

Etude statistique pour la prévision de la variabilité du système d'upwelling et projets de publications.

II-6-8 BUDGET

BESOINS	COÛT
EQUIPEMENT INFORMATIQUE POUR FAIRE TOURNER LE MODÈLE DANS DE BONNES CONDITIONS	
1 ordinateur LINUX (biprocasseur Pentium XEON) connectés à un serveur LINUX chargé de l'archivage (1.75 Tera bytes en RAID 5). Sauvegarde assurée par bandes super DLT. Connexion via un réseau haut débit	4 500 000 FCFA
Pour faire tourner les modèles neuronaux 1 ordinateur LINUX (biprocasseur)	<u>2 500 000</u>
Licences Matlab et documentation en modélisation numérique	3 000 000 FCA
<i>SOUS TOTAL EQUIPEMENT INFORMATIQUE</i>	<i>10 000 000 FCFA</i>
CAMPAGNE ET MATERIEL DE MESURE	
Une station météo complète de type Campbell avec transmission Argos transport et installation compris (sans émetteur argos 6 000 000 fcfa)	10 000 000 FCFA
Un lanceur XBT, un logiciel d'acquisition 108 sondes XBT (Sippican).	1 000 000 FCFA 4 000 000 FCFA
Transport de Matériel Brest-Dakar-Brest (XBT, sondes CTD, Matériel de flaconnage, Matériel de filtration, Radiomètre Simbad...	2 000 000 FCFA
3 Campagnes de mesure le long d'une radiale entre Dakar et Cap Vert (3*5 jours) <ul style="list-style-type: none"> ▪ phase de mise en place de l'upwelling (5 jours) ▪ upwelling pleinement développé (5jours) ▪ absence complète de l'upwelling (5 jours) 	
Affrètement du navire comprenant les charges du navire (carburant, eau douce, divers lubrifiants, produits d'entretien, pharmacie, imprévus...), l'intendance (repas équipage et scientifiques) (3*5 jours)	10 000 000 FCFA
Participation d'un technicien de l'USMM/IRD (3*5 jours)	3 000 000 FCFA
SOUS TOTAL CAMPAGNE ET MATERIEL DE MESURE	40 000 000 FCFA
MISSIONS ET FONCTIONNEMENT	
2 missions de travail à Brest (V.1)	2 250 000 FCFA
2 missions de travail à Paris (V.2 et V.3)	2 250 000 FCFA
2 missions de participation aux ateliers AMMA (V.1, V.2 et V.3)	<u>2 250 000 FCFA</u>
2 missions de participation aux conférences AMMA (V.1, V.2 et V.3)	2 250 000 FCFA
SOUS TOTAL MISSIONS ET FONCTIONNEMENT	9 000 000 FCFA
Forfait intervention ingénieur Système pour maintenir l'ensemble (12 mois)	1 200 000 FCFA
TOTAL BUDGET THEME OCEAN-ATMOSPHERE	60 200 000 FCFA
PS : Coût de location du navire (3*5 jours)	15 000 000 FCFA
Indemnités Matelots officiers scientifiques	3 090 000 FCFA

II-7 IMPACTS DE LA MOUSSON SUR LE PASTORALISME.

Grégoire Leclerc (PI) et Pôle Pastoral Zones Sèches (PPZS)

II-7-1 INTRODUCTION

Les effets néfastes de la sécheresse et de la désertification conjugués à la démographie croissante sont les principales causes avancées pour expliquer la crise généralisée qui secoue les écosystèmes arides et semi-arides depuis quelques décennies.

Malgré ces contraintes associées au désintéressement des investisseurs et des pouvoirs publics, l'élevage pastoral est demeuré une activité majeure dans les systèmes de production de ces zones. Les sociétés pastorales qui ont résisté à ces bouleversements ont ajusté leur mode de vie et de production à ces nouveaux contextes.

En zone aride et semi-aride, le mode de vie prédominant est le pastoralisme. Environ 40 millions de personnes dans le monde dépendent de l'élevage dont près de la moitié est constituée de pasteurs africains (Sandford, 1983). L'élevage sur parcours produit dans le monde environ 23% de la viande bovine. Treize pour cent de cette production proviennent d'Afrique. L'Afrique subsaharienne représente 40% de la superficie mondiale des terres de parcours en zones arides et semi-arides à égalité avec les pays de l'OCDE (essentiellement Amérique du Nord et Australie) mais abrite 55% du cheptel de ces systèmes d'élevage. Dans cette région, le pastoralisme en zones sèches fait vivre 34% de la population agropastorale, représente 47% du cheptel, occupe 52% des pâturages, contribue à 55% de la production laitière et autant pour la viande (FAO 1994). Il y a donc un fort enjeu économique et écologique à sécuriser l'élevage en zones sèches dans le contexte actuel d'« aridification », d'accroissement de la population, de la pression foncière et de la demande en produits animaux. Cette sécurisation doit accompagner le développement d'un élevage plus intensif dans un processus général de décentralisation, de libéralisation, et d'urbanisation.

Au cours de ces dernières décennies, les politiques de développement de l'élevage ont échoué sur la plupart du continent africain. Les coûts des projets d'élevage évalués à des millions de dollars n'ont donné que peu ou pas de résultats. Plusieurs bailleurs de fonds et d'autres institutions internationales ont effectivement abandonné les régions arides dans leurs efforts de développement (Baxter, 1994 cité dans Scoones 1994). Cependant dans les années 1995, il y eut regain d'intérêt de la part des bailleurs de fonds, des gouvernements et des ONG en matière de développement de l'élevage. Ce changement d'attitude est dû aux efforts de recherche et de développement qui ont révélé la durabilité et le caractère approprié des systèmes pastoraux mobiles et aux réalités écologiques des terres arides, à l'importance économique de la production animale sur les terres de faible rendement et au prix à payer en termes de coûts socio-économiques et des conséquences écologiques lorsque l'on néglige les pasteurs (Sandford, 1983).

Les politiques de développement de l'élevage en régions chaudes traitent traditionnellement ensemble deux questions clefs : l'approvisionnement des marchés urbains en produits animaux, et le développement du pastoralisme en zones sèches, comme les deux faces d'une solution à une contrainte nationale récurrente : approvisionner les villes. Ce thème se repère dès les années 1910 dans le courrier de l'administration coloniale (archives nationales d'Abidjan).

La sécurisation et l'amélioration des productions animales sont un des éléments du pastoralisme ; mais les éleveurs sont également soumis à d'autres contraintes. Les travaux du PPZS s'attachent à caractériser la dynamique du pastoralisme, à travers le mode de vie, l'évolution des productions et l'adéquation aux ressources. C'est pourquoi il est nécessaire d'étudier les ressources économiques, les supports sociaux et biologiques ainsi que l'organisation spatiale sur lesquels s'appuie le pastoralisme.

Un autre enjeu est d'éprouver sur le terrain des zones arides une recherche qui voit chez les pasteurs et les autres intervenants des sujets créateurs de normes et de pratiques, et qui met à l'épreuve ses propres représentations.

Il s'agit également de développer des outils pour la gestion des ressources qui soient spécifiques de la problématique de désertification de la zone sahélienne. La décentralisation en matière de gestion des ressources représente une avancée importante. La recherche doit pouvoir répondre à la demande d'instruments de gestion aux différentes échelles (indicateurs, systèmes d'information, modèles de production et d'exploitation, nouvelles technologies). Les spécificités pastorales (milieu, systèmes de production) ne permettent pas de transférer tel quel les outils élaborés ailleurs. Il faut adapter, innover en la matière.

II-7-2 LES OBJETS D'ETUDE

Les zones sèches

Le domaine sahélien est défini dans la zone éco-climatique comprise entre les isohyètes 100 et 600 mm, le long d'une bande de 400 à 600 km du nord au sud s'étendant de l'Atlantique à la Mer Rouge (Le Houérou 1972, Boudet & al. 1976). Il est caractérisé par la prédominance des sols sableux d'origine fossile sur lesquels se développent des formations steppiques à épineux et un tapis discontinu à graminées annuelles. Ce sont des terres de transhumance et de nomadisme avec quelques zones de cultures (sous-pluie, de décrue ou d'irrigation). Le bétail comprend des zébus et métis, des petits ruminants, des dromadaires, des équidés qui exploitent les parcours traditionnels.

Les zones sèches représentent un sous-ensemble du Sahel caractérisé par l'aspect très aléatoire des cultures pluviales (pluviosité inférieure à 400 mm.an-1) qui contribue à rendre largement prépondérante l'activité d'élevage. Cependant, l'agriculture et l'exploitation des ressources forestières jouent des rôles non négligeables et les interactions avec les systèmes de production, les ressources et les espaces des zones méridionales sont importantes, notamment en terme de mobilité.

Ces écosystèmes sont très largement représentés dans la région nord-est du Sénégal (15°nord - 15°ouest), appelée Ferlo. Région sylvo-pastorale à fortes potentialités fourragères, cet ensemble géographique était traditionnellement fréquenté la moitié de l'année par des pasteurs Peul. La transhumance s'opérait entre la vallée du fleuve Sénégal "Waalo" où les animaux résidaient en saison sèche, et l'ensemble sableux du "Jeeri", traversé par les vallées fossiles du Ferlo, aux alentours des puits céanes, en saison des pluies (Barral & al. 1983, Touré O. & al. 1996). La politique d'hydraulique pastorale initiée par l'administration a restructuré profondément l'espace et les pratiques pastorales, en substituant à l'agencement des différents pâturages soumis à des droits prioritaires des éleveurs (huurum) et à une exploitation saisonnière, une vaste zone régulièrement

maillée de forages autour desquels une certaine sédentarisation s'est effectuée avec augmentation de la charge animale (cf infra).

Le pastoralisme

Le pastoralisme est un mode de vie dans la mesure où les pratiques autour de l'élevage extensif structurent les rapports de production et d'échange, mais aussi de propriété et de parenté. Il représente non seulement un système de production mais une culture sociale : « Dans une société pastorale (...), ce qui compte en premier lieu c'est tout l'ensemble de droits et d'obligations qui rassemblent les individus par rapport à la plus importante forme de propriété, à savoir celle du bétail. C'est la propriété du bétail qui fonde les rapports de parenté, et il y a une identification profonde entre structure de parenté et relations de propriété » (Bonfiglioli, 88). Les autres activités de production agricole sont ici marginales.

Aujourd'hui, les sociétés pastorales en zone sahélienne affrontent deux nouvelles mutations de leurs bases. La première remet en cause le lien étroit qui les relie à leur environnement naturel : après deux pics de sécheresse en une dizaine d'années, l'alourdissement des pressions anthropiques sur les ressources, la tension s'accroît entre les intérêts individuels et collectifs et risque de décrocher les éleveurs de leurs supports en ressources naturelles. Ceci remettrait radicalement en question leur genre de vie. Mais, celui-ci n'est peut-être déjà plus associé aussi étroitement au troupeau. En effet certains éleveurs dépendent de plus en plus de ressources non pastorales, et à l'inverse, de plus en plus de troupeaux appartiennent à des non pasteurs. Pourtant ces éleveurs se pensent et se disent transhumants, parfois sans avoir transhumé depuis plusieurs années. Nostalgie d'un mode de vie passé, mobilité tenue en réserve, ou usage de nouvelles ressources locales ?

La seconde mutation concerne le positionnement de ces sociétés vis-à-vis de leur environnement politique et économique : elles ont longtemps pu négocier leur rapport politique et économique aux Etats en préservant leur structure, dont les éléments clefs étaient la mobilité et des unités de production restreintes et autonomes (Swift, 88). Ceci n'implique pas l'autarcie : dans le Sahel tchadien, des communautés d'éleveurs ont tiré parti de leur positionnement au sein du pouvoir central pour renforcer leurs droits pastoraux locaux (Clanet, 1998). Mais ceci existait dans des espaces vastes, peu ou pas colonisés par l'agriculture, et sous un pouvoir centralisé peu soucieux d'interventions ou de « participations » locales, réelles ou figurées. De plus en plus souvent au Sahel, du fait de l'expansion agricole, une frange croissante est habitée par une population hétérogène, qui recherche sa sécurité alimentaire en s'impliquant à divers titres dans des activités diversifiées et des interventions locales de l'Etat ou d'institutions de développement.

II-7-3 OBJECTIFS

Objectif Général. Le but de cette étude est d'analyser les interactions entre les systèmes pastoraux sénégalais et la mousson africaine, et comment les changements du contexte socio-économique affectent cette interaction.

Objectifs spécifiques. Les objectifs peuvent être déclinés selon quatre axes.

- 1) Analyser l'impact de la mousson sur l'économie pastorale

- 2) Analyser l'impact de la mousson sur la mobilité pastorale et la capacité d'adaptation des sociétés pastorales.
- 3) Etudier l'impact de la mousson sur la dynamique des ressources végétales et hydriques des zones sèches.
- 4) Appréhender le rôle de la mousson dans la gestion des unités pastorales.

II-7-4 EQUIPE IMPLIQUE DANS LA MISE EN ŒUVRE DU PROGRAMME

Le volet pastoralisme sera mis en oeuvre par le Pôle Pastoral Zones Sèches, un Groupement d'Intérêt Scientifique multidisciplinaire créé en 2001 qui regroupe 17 chercheurs provenant de 5 institutions : le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), le Centre de Suivi Ecologique (CSE), l'Ecole Nationale d'Economie Appliquée de Dakar (ENEA), l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar. C'est aussi un Pôle de Compétence en Partenariat du CIRAD.

II-7-5 METHODOLOGIE

Le programme de recherche proposé comporte 4 volets :

- 1) L'économie pastorale : cueillette et marché.
- 2) Les systèmes de production : mobilité et adaptation
- 3) La dynamique et le suivi des ressources pastorales
- 4) La gestion des parcours pastoraux

II-7-5-1 *L'économie pastorale : cueillette et marché*

Objet de peu de travaux de première main, l'économie pastorale peut être décrite indirectement comme visant d'abord l'auto-reproduction, la satisfaction des besoins, capable de sous-emploi, intéressée par les changements techniques ou administratifs dans la mesure où ils sécurisent la situation, et diminuent la pénibilité du travail. L'économie pastorale est plus sensible aux risques et aux coûts de production qu'aux incitations de prix ; socialement plus marginalisée que l'économie agricole, elle est exposée à des risques particuliers (faible prise en compte par les politiques économiques, dispersion, vulnérabilité foncière) mais offre en contrepartie une relative souplesse : le capital en bétail peut être déstocké rapidement en cas de besoin, la mobilité permet de réagir à plusieurs contraintes climatiques ou sociales.

L'économie pastorale tire ses ressources de deux pôles, le marché et les ressources naturelles, que les éleveurs exploitent selon les opportunités et les contraintes. Au Ferlo (Sénégal), les politiques de développement ont contribué à modifier l'équilibre entre ces ressources, en diminuant la mortalité du bétail grâce aux vaccinations systématiques, en installant un maillage régulier de forages à partir des années cinquante, en aménageant les bas-fonds du fleuve, en intervenant sur les prix du bétail et ses

coûts de production au début des années quatre-vingts, en tentant d'organiser la gestion des ressources naturelles depuis les années quatre-vingt-dix.

- L'usage des ressources naturelles, qui semble apparenté à un mode de cueillette, est en réalité de plus en plus souvent négocié d'une façon ou d'une autre.
- Une partie croissante des échanges suit la logique marchande mais on sait que les marchés eux-mêmes sont structurés par les politiques et par des jeux d'acteurs plus complexes qu'une fonction classique d'offre /demande.

Spécifiquement, ce volet étudiera **l'impact de la MOA sur l'économie pastorale** : termes de l'échange, risque climatique, coûts de transhumance et d'approvisionnement en eau, maladies du bétail, productivité des troupeaux.

Ceci demandera d'abord une analyse historique de la distribution et de l'évolution des prix (notamment de l'eau) et de la variabilité climatique. Les autres études du programme AMMA (notamment sur les maladies du bétail et l'hydrologie) serviront à caler les modèles économiques qui seront développés. Des enquêtes et des collectes de données par des collaborateurs sur place (ex. sur les marchés hebdomadaires) permettront de quantifier et spatialiser les termes de l'échange et de les lier à la pluviométrie, notamment lors de la période SOP.

II-7-5-2 *Les systèmes de production : mobilité et adaptation*

D'un point de vue zootechnique ou agronomique, les systèmes d'élevage pastoraux relient « l'ensemble des techniques et des pratiques mises en œuvre par une communauté pour faire exploiter, dans un espace donné, des ressources végétales par des animaux, en tenant compte de ses objectifs et des contraintes du milieu » (Lhoste, 1986). Ils sont aussi définis, en mettant l'accent sur l'organisation sociale, comme le « produit d'un groupe de producteurs socialement organisés et ayant mis au point et adopté un certain nombre de techniques de travail, conditionnées elles-mêmes par un environnement physique et économique et les contraintes de l'environnement social de ce groupe » (Hochet, Le Grand, 1998). Au Sénégal, c'est l'expansion du bassin arachidier où la politique de régionalisation influent sur la mise en valeur des ressources et l'évolution des systèmes (Tourrand, 93).

La nécessité de la mobilité de l'élevage pastoral est aujourd'hui admise (Plan stratégique régional ISRA 1998-2003, Zone sylvo-pastorale, CRPPS) et l'approche officielle du pastoralisme en recherche-développement dépasse le cadre de la « gestion de terroirs villageois », qui était centrée sur les sédentaires (Niamir-Fuller, 1998). En effet, en région pastorale, l'unité socio-spatiale concernée par l'accès et la gestion des parcours est souvent plus large que le terroir.

D'une façon générale, si l'approche système est fructueuse pour aborder certains ressorts techniques, elle perd toutefois de sa validité pour traiter de concepts centraux en sciences sociales (conscience collective, rôle dans les échanges économiques et la construction des normes sociales en vigueur...) ou tout simplement pour comprendre « ce qui fait tenir ensemble cette société pastorale aujourd'hui ».

De très nombreux travaux en sciences humaines ont abordé les groupes pastoraux sous l'angle des structures ou des dynamiques spatiales, sociales et idéologiques.

Spécifiquement, ce volet vise à **comprendre la structure des mouvements de transhumance et prédire les flux en fonction de la variabilité de la pluviométrie et d'autres facteurs socio-économiques**.

Il s'agira de calibrer un modèle de la théorie générale du mouvement pour la transhumance, avant et après la MOA. Ceci se basera sur une étude en cours de l'évolution historique de la mobilité, et sur des mesures précises (temporellement et spatialement) de disponibilité fourragère et hydriques (forages, mares), mais aussi des enquêtes et des collectes de données par des collaborateurs locaux (ex. au niveau des forages) visant à déterminer les parcours des transhumants, l'attractivité des zones d'accueil (pâturage, eau, réseaux sociaux, marchés, foncier), et les coûts associés à la transhumance. Pour la période SOP on tentera de suivre de manière précise un échantillon représentatif de transhumants (GPS, journal) et voir en quoi leur choix de parcours est lié à la pluviométrie.

II-7-5-3 *La dynamique et le suivi des ressources pastorales*

Pendant longtemps, les pouvoirs publics ont été demandeurs d'informations précises et actualisées sur l'état des ressources primaires. Plusieurs programmes nationaux, régionaux et internationaux ont été initiés pour caractériser l'état des ressources naturelles et proposer des plans d'exploitation rationnelle. Toutefois, les échelles d'analyse et les niveaux d'intervention étaient devenus très vite incompatibles aux réalités du milieu. Associés à la protection sanitaire du bétail, ils ont pourtant contribué à accroître l'utilisation des ressources et à réduire la mobilité. Pour le secteur de l'élevage, des cartes de végétation ou de biomasse (1/1.000.000) ont été établies par le CSE. Mais elles n'ont apporté aucune information pertinente pour l'éleveur.

Les ressources végétales.

Ces zones arides et semi-arides d'Afrique sub-saharienne ont subi depuis le début des années 1970 plusieurs épisodes de sécheresse dont les plus sévères ont été en 1972-73 et 1983-84. Leurs impacts sur les parcours sahéliens, avec des sols les plus pauvres du monde (Bremen 1998) ont été évalués dans le cas de nombreux travaux (Gaston 1981, Valenza 1981, Grouzis 1988, Boudet 1989, Hiernaux et al 1991). Ces travaux ont mis en évidence :

- la quasi-disparition des graminées pérennes (*Andropogon gayanus*, *Aristida stipoides*, *Diheteropogon hagerupii*, *Hyperthelia dissoluta*,...) qui occupaient parfois plus de 15 % de l'espace;
- une raréfaction de certaines espèces ligneuses (*Acacia senegal*, *Commiphora africana*, *Combretum glutinosum*, *Dalbergia melanoxylon*, *Grewia bicolor*, *Pterocarpus lucens*, *Sclerocarya birrea*, *Terminalia avicennioides*) ;
- une diminution de la couverture végétale consécutive à une mortalité importante des ligneux et l'exposition des sols au phénomène d'érosion éolienne et hydrique.

Au cours de la dernière décennie, des travaux (Miehe, 1991 ; Charbonnier, 1998) ont montré une grande résilience dans les écosystèmes sahéliens. Quelques années de pluviosité favorable ont montré

la capacité de la végétation à se reconstituer, et du cheptel de continuer de croître (FAO 1997). Cependant, on ne note pas encore la réapparition des espèces herbacées pérennes, qui sont donc devenues rares. Un climat toujours plus variable et une pression de pâturage forte limitent leur aire d'extension aux zones à bilan hydrique favorable.

En ce qui concerne les ligneux, la raréfaction des espèces se traduit par une simplification de la strate. Quelques espèces dominent largement par endroits ; ce sont généralement des espèces ubiquistes (*Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*). Les produits ligneux et non ligneux (feuilles, fruits), donc le fourrage aérien aussi, sont devenus d'accès difficile alors que ce fourrage ligneux pouvait constituer 50 à 90% de la ration alimentaire des animaux (Guérin 1987).

Les conséquences de cette crise sont multiples - modification de la composition et de la diversité floristiques, baisse de la productivité de la végétation (Grouzis *et al* 1991, Akpo *et al* 1995) et de la qualité nutritionnelle des herbages (Penning de Vries et Djiteye 1991, Somé *et al* 2000), de même qu'une fragilisation des écosystèmes en relation avec une modification de structure et une baisse de la fertilité du sol (Penning de Vries et Djiteye 1991, Campa *et al* 1998)-.

Dans les écosystèmes sahéliens, la régénération naturelle des peuplements ligneux est quasi inexistante, à l'exception des espèces ubiquistes, même après mise en défens de plus de 10 ans (Miehe 1991). Beaucoup d'espèces sont représentées en effet par des individus adultes (Vincke, 1996 ; Diouf *et al.*, 2002). Parmi les facteurs en cause, alors que le passage dans le rumen favorise la germination des semences de certaines espèces (*Acacia tortilis*, *Ziziphus mauritiana* ...), celles d'autres espèces y sont détruites, *A. senegal* par exemple, (Danthu *et al* 1996 ; Gueye, 1996).

Pour compenser ce déclin, il importe de rechercher les principales voies de reproduction -sexuée et végétative - des espèces ligneuses sahéliennes (Bellefontaine *et al* 1997, Campa *et al* 1998).

Les campagnes de reboisement lancées à coup de milliards de francs CFA au Sahel ont aussi très tôt montré leurs limites pour n'avoir pas impliqué les populations de ces milieux. L'impact de ces opérations sur les plans socio-économique et écologique, n'a d'ailleurs pas été évalué.

Les ressources en eau.

Dans les pâturages, l'eau est aussi nécessaire pour les animaux que le fourrage. Les eaux de surface permettent aux animaux de s'abreuver eux-mêmes et évitent à l'agriculteur de fournir des efforts ou des dépenses liées à la construction de points d'eau artificiels (ex : Puits et Forages).

Les variations saisonnières relatives aux disponibilités en eaux de surface sont à l'origine des déplacements du bétail entre les zones de pâturage de la saison humide et celles de la saison sèche, indépendamment de la disponibilité de fourrage dans les pâturages de saison sèche.

Les mares naturelles, les rivières et les retenues d'eau artificielles sont à l'origine de la répartition des animaux par rapport aux ressources fourragères. Un nombre insuffisant de points d'eau risque d'entraîner un surpâturage localisé. L'installation de points d'eau de surface supplémentaires est une technique importante qui permet une répartition optimale de la pression de pâturage dans les parcours naturels.

Avec l'augmentation de la densité de la population, l'approvisionnement en eau destinée à l'élevage et en eau domestique a été un aspect clé du développement des parcours dans les zones semi-arides, où l'eau de surface pose problème.

Le développement de points d'eaux sur des ressources limitées, et dans certains cas saisonnières, d'eau de nappes superficielles et d'eau profonde a pour conséquence une concentration de la pression de l'élevage. L'impact le plus évident est produit sur la végétation, le surpâturage localisé provoquant une dégradation des "zones sacrifiées" autour des points d'eau. Cependant, l'impact produit sur l'eau se fait par la contamination directe des points d'eau, qui sont souvent partagés entre la consommation du bétail et celle de l'homme en raison de leur disponibilité restreinte. Cette utilisation partagée est le principal problème en ce qui concerne les ressources en eau de surface. La contamination directe de l'eau par les excréments, l'urine et la boue augmente considérablement les risques de santé pour l'homme et le bétail.

Lorsque l'environnement devient plus humide, la quantité d'eau disponible augmente, la compétition pour les sources d'eau diminue et la pression résultant de l'abreuvement s'étend sur des zones plus vastes, avec moins de risques de contamination. Dans ces zones, la principale préoccupation est rarement la contamination de la source d'eau, mais plutôt la destruction de la végétation riparienne et la perte éventuelle de la biodiversité. La végétation riparienne reçoit généralement 20 à 30 % de pression de pâturage de plus que les zones voisines et se trouve souvent fragilisée morphologiquement.

La protection des sources d'eau n'est pas compliquée. On peut limiter l'abreuvement du bétail aux zones situées au dessous des points d'extraction de l'eau destinée à la consommation humaine. On peut couvrir les forages et les puits. On peut traiter l'eau. Cependant, dans les zones semi-arides, les ressources pour le développement sont limitées et le traitement de l'eau passe bien après le besoin de s'approvisionner en quantité suffisante.

Spécifiquement, ce volet portera sur les ressources végétales et les ressources hydriques du Ferlo.

Nous tenterons de **valider les indicateurs biologiques de la MOA**. Il s'agira d'étudier, en parallèle avec les discours des éleveurs, le comportement de la végétation (notamment la phénologie des ligneux) en fonction du climat, de façon à tester la pertinence des indicateurs météorologiques indigènes (suivi et alerte précoce). Le *Commiphora africana*, par exemple, est une espèce indicatrice utilisée par les éleveurs pour évaluer l'évolution de la mousson. Des graminées pérennes comme *Andropogon gayanus*, qui abondaient dans le ferlo, ne se trouvent plus qu'autour des mares. Des données phénologiques et climatiques seront collectées selon un large échantillon spatial, et couplées avec des entretiens avec les éleveurs de ces zones qui permettront de mieux comprendre leur perception du climat en relation avec l'évolution de la végétation. Cette étude sera couplée avec l'étude de l'évolution de la biomasse fourragère réalisée par le CSE.

En parallèle nous étudierons **l'hydrologie et la gestion des mares du ferlo**. Il s'agira de comprendre et de calibrer les paramètres hydrauliques des mares et leur relation avec les pratiques d'usage de cette importante ressource. Un projet CORAF en 2002 a permis le suivi de quelques mares du Ferlo et une évaluation préliminaire des facteurs importants. La grande variabilité climatique et le déficit hydrique de 2002 ont cependant limité fortement les possibilités de mesure. Nous choisirons une quarantaine de mares dont plusieurs seront équipées de talymètres et dont nous prélèverons des échantillons d'eau pour en vérifier la qualité. Le suivi consistera également en un journal des usages des mares tenu par les éleveurs de la zone. Cette étude sera faite en collaboration avec l'équipe AMMA-hydrologie.

II-7-5-4 La gestion des parcours pastoraux

La mobilité des troupeaux est un paramètre structurel caractérisant l'élevage sur parcours. Les besoins d'intensification de l'agriculture pour satisfaire une population toujours croissante ont conduit à considérer l'élevage sur parcours comme un système peu ou pas productif voire anti-économique.

D'ailleurs la disponibilité permanente des ressources en eau a profondément bouleversé les systèmes de production pastoraux. L'apparition des forages et/ou des puits-forages a conduit à la sédentarisation des éleveurs et à une augmentation de la charge autour des ouvrages (Touré et Arpaillange 1986, Diop 1989, Clanet 1999). Parallèlement, le développement du front agricole qui s'est traduit par l'aménagement de périmètres irrigués (Tourrand 1993) et l'extension des surfaces cultivées sur les parcours traditionnels de saison sèche ont réduit les alternatives de gestion des pasteurs. La mobilité dans ce système d'élevage se trouve ainsi réduite ; c'est une pratique pourtant à préservée car elle paraît apte et efficace pour valoriser ces ressources communes (Benhke et al 1993).

Aussi, admet-on aujourd'hui que l'agriculture dans les zones marginales (pluviosité < 400 mm) n'est pas un système durable dans le contexte actuel. Les sécheresses ont d'ailleurs démontré l'incompatibilité de cette combinaison d'options avec le milieu sahélien "en déséquilibre" qui nécessite mobilité, opportunisme et adaptabilité (Benhke et al 1993), en particulier lors des crises climatiques.

La gestion des terres de parcours doit donc être abordée avec la mobilité de l'élevage pastoral à l'échelle de la région, en relation avec les autres systèmes de production, afin de promouvoir une gestion concertée de l'espace.

Plus près de l'animal et de la plante, les travaux sur le comportement des ruminants sur pâturages sahéliens (Guérin et al 1988, Nolan et al 1995, Ickowicz 1995) ont montré l'importance des facteurs liés à l'espèce animale, la saison, la composition botanique et la qualité des régimes ingérés. L'utilisation complémentaire des strates de végétation par des troupeaux mixtes dont on contrôle la composition et la charge peut constituer un outil de gestion et de valorisation de la ressource (Sall et al 1993).

Dans ce volet, nous étudierons **l'adaptation au climat et au changement climatique dans la gestion d'une unité pastorale.**

Il s'agira de mieux comprendre les mécanismes de gestion de l'incertitude et du risque climatique dans une démarche participative de gestion intégrée d'une unité pastorale. Cette recherche-action s'appuiera sur la cartographie concertée du territoire (ex. POAS) et sur les plans locaux de développement (PLD). Nous étudierons les stratégies de mobilité et de gestion de l'eau de surface au sein de l'UP pendant la saison des pluies, de même que la négociation des usages de l'espace entre pasteurs et agriculteurs. Nous utiliserons notamment les simulations multi agents (Bah et al, 2004) en accompagnement de l'élaboration de stratégies de co-gestion.

II-7-6 BUDGET

x 1000 CFA	Sollicité	Contrepartie	TOTAL
Personnel du projet		100,000	100,000
Consultants	10,000		10,000
Appui administratif	10,000	10,000	20,000
Voyages	20,000	10,000	30,000
Sous-contrats	10,000		10,000
Bourses d'étude	15,000	5,000	20,000
Formation (groupes)	5,000	5,000	10,000
Réunions, conférences	5,000	5,000	10,000
Consommables	5,000	5,000	10,000
Equipement	7,000	10,000	17,000
Location de bureaux	1,000	2,000	3,000
Entretien	2,000	5,000	7,000
Rapports	2,000	1,000	3,000
Communication (internet, poste, etc..)	2,000	2,000	4,000
Hospitalité	1,000		1,000
TOTAL	105,000	160,000	265,000

II-7-7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Akpo L.E., Grouzis M., Ba A.T. 1995. « L'arbre et l'herbe au Sahel : effets de l'arbre sur la composition chimique des pâturages naturels du Nord-Sénégal (Afrique de l'Ouest) ». Revue Méd.Vét., 146 10 : 663-670.

Ancey V. 1996. Trajectoires pastorales et politiques économiques de l'élevage ; éleveurs transhumants dans le nord de la Côte d'Ivoire, thèse de doctorat de l'EHESS.

Ancey V. Ki-Zerbo B. 1998. « Consommation alimentaire urbaine et hausse des prix à Ouagadougou » SAH/D (98)487. Club du Sahel.

Ba C. 1986. Les Peuls du Sénégal. Etude géographique. Dakar.

Bah, A. et al , 2004. xx

BARA : Bureau of Applied Research in Anthropology, university of Arizona.

Barbault R., 1997. Biodiversité, éditions Hachette Supérieur, 159 pages,

Barral, H. & al., 1983. « Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo ». GRIZA/LAT-ISRA; GERDAT/ORSTOM, 172 p.

Barral, H., 1982. « Le Ferlo des forages : gestion ancienne et actuelle de l'espace pastoral ». 85 p. 10 figures ORSTOM, Dakar.

Barth F. 1973. A general perspective on nomad-sedentary relations in the middle-East ». in C. Nelson, ed, The desert and the Sown : Nomads in the wider society. California : University of California Press, Institute of International Studies.

Basset T. 1986. Fulani herds movements », geographical review, LXXVI (3), pp223-249

Behnke R. Scoones I. 1992 : Repenser l'écologie des parcours : implications pour la gestion des terres de parcours en Afrique. Dossier 33, Londres, IIED.

Behnke R.H., Scoones I., Kerven C. 1993. Range Ecology at Disequilibrium.ODI, IIED, London 248 p.

- Bellefontaine R., Gaston A., Petrucci Y. 1997. Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches. Cahier FAO Conservation N° 32. 316 p.
- Benoît M. 1979. Le chemin des Peuls du Boobola. Paris, Orstom.
- Bernus E. Touaregs nigériens. Unité culturelle et diversité régionale d'un peuple pasteur, Paris Orstom (Mémoire 94). 1981.
- Blanc-Pamard C., 1990. « Lecture du paysage, une proposition méthodologique », in séminaire sur la "Dégradation des Paysages en Afrique de l'ouest" pp 269-280
- Bonfiglioli A.M 1990. « Pastoralisme, agro-pastoralisme et retour : itinéraires sahéliens », in Sociétés pastorales et développement, Cahiers des Sciences Humaines n° 26, Orstom, pp 255-267
- Bonfiglioli A.M 1992. « L'agro-pastoralisme au Tchad comme stratégie de survie. Essai sur la relation entre l'anthropologie et la statistique ». 57 p. doc de travail n°11, enquêtes et statistiques. DSA, Banque Mondiale.
- Bonfiglioli A.M. 1988. Dudal. Histoire de famille et histoire de troupeau chez un groupe de Wodaabé du Niger. MSH.
- Bonfils M. , 1989. Halte à la désertification au Sahel, éditions Karthala Cta, 263 pages
- Bonnet B. 2000. « Gestion commune des ressources naturelles : vers un renforcement des capacités locales ». IIED, dossier n°94.
- Botte R. ; Schmitz J. eds. L'archipel peul, n° sp. Cahiers d'Etudes africaines, 1994.
- Botte R., Boutrais J., Schmitz J. eds. Figures peules, Karthala, 1999.
- Boudet G. 1984. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères, Manuel et précis d'élevage N°4, éditions du Ministère de la Coopération, IEMVT, 266 pages
- Boudet G. 1989. « Evolution de la végétation des parcours sahéliens et possibilités de réhabilitation ». Fourrages 120 : 401-415
- Boutrais J. 1978. Deux études sur l'élevage en zone tropicale humide. Paris Orstom
- Breman H., Sissoko K. 1998. L'intensification agricole au Sahel. IER, AB-DLO-DAN-UAW, Karthala Paris, 996 p.
- Campa C., Grignon C., Guèye M., Hamon Eds. 1998. L'acacia au Sénégal. ORSTOM-ISRA, Colloques et séminaires, 476 p.
- Charbonnier V. 1998. « Pratiques des sociétés pastorales du Kanem : rôle des Ouaddis et des ligneux dans la sécurisation des usages pastoraux » DESS Gestion des systèmes agrosylvopastoraux en zones tropicales Créteil : 89p + annexes
- Chauveau J.-P. 1998. « La logique des systèmes coutumiers » in Lavigne-Delville (ed) Quelles politiques foncières pour l'Afrique noire ? Karthala.
- Clanet J.C 1998. « Structures spatiales et aires pastorales (ou les limites des Etats-nations et des organisations tribales en Afrique centrale) », in Actes du colloque Hermes, Orléans
- Clanet J.C. 1999. Stabilité du peuplement nomade au Sahel central. Sécheresse 10 (2) : 93-103.
- Coulomb J., Serres H., Tacher G. 1980. L'élevage en pays sahéliens, éditions PUF, Techniques vivantes, 192 pages.
- Courel, M-F., 1983. « Analyse des changements biogéophysiques dans le Sahel à partir des mesures des satellites ». Publ. Centre Scientifique IBM France, F 061, 31 p., annexes, Paris.
- Courel, M-F., 1984. Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse pour le doctorat d'état ès - lettres et sciences humaines. 407 pages, annexes.
- CRPPS 1998. (Comité régional de prospective et de planification stratégique) Plan stratégique régional 1998-2003. Zone sylvo-pastorale.
- Daget Ph., Gaston A. 1999. « Flotrop : constitution d'une base de données sur les pâturages d'Afrique tropicale septentrionale ». Sécheresse, 10 (3): 183-189.
- Daget Ph., Godron M. 1995. Pastoralisme : troupeaux, espaces et sociétés, éditions Hatier - Aupelf - Uref, 510 pages.

- Dahou T. 1999. « Jeux d'acteurs autour du développement institutionnel », in Grassroots organizations, decentralization and rural development : african experiences in the 1990s (proceedings from a workshop), Holmen H. et Luzzati E. (eds) ITC of the ILO.
- Danthu P., Ickowicz A., Friot D., Manga D., Sarr A. 1996. « Effet du passage par le tractus digestif des ruminants domestiques sur la germination des graines de légumineuses ligneuses des zones tropicales sèches ». *Revue Elev.Méd.vét.Pays trop.*, 49 (3) : 235-242.
- De Bruijn M. et Van Dijk, H. *Arids ways. Cultural understandings of insecurity in Fulbe society*, Central Mali, Amsterdam, Thela Publishers. 1995
- De Haan C., Steinfeld H., Blackburn H. 1997. « Livestock and the environment. Finding a balance. Commission of European Communities », FAO, Woldbank, 115 p.
- De Haan C., Steinfeld H., Blackburn H. 1999. *Elevage et Environnement. A la recherche d'un équilibre*. FAO, 115 p.
- De Wispelaere, G. & Noël, J., 1985. *Utilisation des données satellitaires dans une démarche de suivi de la dynamique de la végétation pastorale sahélienne dans le nord Sénégal. Rapport scientifique de l'ATP Télédétection Spatiale, IEMVT-CIRAD / ORSTOM*, 41 pages et annexes
- De Wispelaere, G., 1980. « Les photographies aériennes témoins de la dégradation du couvert ligneux dans géosystèmes sahéliens sénégalais : influence de la proximité d'un forage ». *Cahier de l'ORSTOM, Série. Sciences Humaines*. Ref ? ? ?
- De Wispelaere, G., 1980. « Systèmes de production d'élevage au Sénégal : étude et cartographie de l'évolution de la végétation par télédétection » *Rapport de la 1ère année*. 162 pages, 23 figures. Maisons-Alfort.
- Diao A.S. 2000. « Caractérisation des dynamiques socio-économiques du pastoralisme dans l'unité pastorale de Thieul ». *Mémoire de fin d'étude d'ingénieur à l'ENEA*. Dakar.
- Diop A.T. 1989. *L'aménagement et la gestion des ressources sylvopastorales au nord du Sénégal : le cas de l'aire d'influence du forage de Tatki*. Thèse de doctorat de 3ème cycle, université Cheikh Anta Diop de Dakar, 190 p.
- Diouf A, 2000. « Analyse du paysage et de l'exploitation des pâturages dans l'unité pastorale de Thieul (Ferlo) », *Mémoire de DEA de Géographie*, UCAD, 66 pages
- Dupire M. 1957. « Les forages dans l'économie peul », in *Eléments de politique sylvo-pastorale au Sahel sénégalais*, cf Grosmaire, fasc 14
- Dupire M. 1962. *Peuls nomades. Etude descriptive des Wodaabé du Sahel nigérien*. Paris, Institut d'ethnologie, réed Karthala, 1996.
- Dupire M. 1970. *Organisation sociale des Peul*. Thèse principale, faculté des lettres, Paris.
- ESAM (enquête sénégalaise auprès des ménages), 1997, DPS, CILSS, Dakar.
- Falloux F., & Mukendi A., 1987. « Lutte contre la désertification et gestion des ressources renouvelables dans les zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest », *Document technique de la Banque Mondiale n° 70*, 131 pages
- Falloux F., 1989. « Information foncière et télédétection au service de la gestion des ressources renouvelables en Afrique Sub-Saharienne : Une démarche axée sur la demande », *Document technique de la Banque Mondiale n° 108*, 89 pages
- FAO 1999. *Livestock – environment interactions, issues and options*. 56 « Livestock and the environment, finding a balance ». 115 p.
- Gallais J. « Les sociétés pastorales ouest africaines face au développement ». *Cahiers d'études africaines*, 47, 12 (3) 1972. *Pasteurs et paysans du Gourma. La condition sahélienne*. Paris CNRS/ Bordeaux, CEGET 1975.
- Gaston A. 1981. *La végétation du Tchad. Evolutions récentes sous des influences climatiques et humaines*. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Paris XII-Créteil, 333 p.
- Grouzis M. 1988. *Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina-faso)*. ORSTOM Paris, Université Paris Sud, Thèse Doctorat d'Etat, 335 p.

- Grouzis M., Nizinski J., Akpo E. 1991. « L'arbre et l'herbe au Sahel : influence de l'arbre sur la structure spécifique et la production de la strate herbacée et sur la régénération des espèces ligneuses ». Actes du IVème Congrès International des Terres de Parcours, 22-26 avril 1991, Montpellier, pp 207-210.
- Guerin H., Friot D., Mbaye Nd., Richard D., Dieng A.. 1988. « Régime alimentaire de ruminants domestiques (bovins, ovins, caprins) exploitant des parcours naturels sahéliens et soudano-sahéliens. II. Essai de description du régime par l'étude du comportement alimentaire. Facteurs de variation des choix alimentaires et conséquences nutritionnelles ». Revue Elev. Méd. vét. Pays trop., 41 (4): 427-440.
- Hiernaux P., Diarra L., Maiga A. 1990. « Dynamique de la végétation sahélienne après sécheresse. Un bilan du suivi des sites pastoraux du Gourma en 1989 ». CIPEA-ILCA (Mali). Document de travail n° 001/90.
- Hochet A.M., Le Grand Y. 1998. Tradition pastorale et modernisation des systèmes de production au Sahel. L'Harmattan
- Hopen C.E. The pastoral Fulbe family in Gwandu (London, Oxford University Press for I.A.I, 1958)
- Ickowicz A. 1995. Approche dynamique du bilan fourrager appliquée à des formations pastorales du Sahel tchadien. Thèse d'Université, Paris XII-Créteil, 470 p.
- IIED, 2000. « Pérennité et diversité : stratégies des foyers en milieu rural au Mali. » Dossier n°97, IER, IDS, IIED.
- Khazanov A.M. 1988. « Nomads and the outside world » Cambridge University Press
- Lacroix, P. F. « Etudes peules : état actuel et perspectives d'avenir », Revue de l'Ecole nationale des langues orientales, I (1964), 79-83
- Larrat R. 1955. « Problèmes de la viande en AOF », éd. Deloutremer.
- Le Houérou H-N., 1988. Introduction au projet écosystèmes pastoraux sahéliens. Rapport général du système mondial de surveillance continue de l'environnement, GEMS, série Sahel, FAO/PNUE, 146 pages.
- Lhoste P. 1986. « Le diagnostic des systèmes d'élevage » in Et. Synth Cirad-Emvt, n°20 Maison Alfort. P 36-59
- Long G.1974. Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire (Monographie N° 4) Tome 1 - Principes généraux et méthodes, édition Masson et Cie, 252 pages.
- Marty A. 1995. « A propos de nos engagements à l'IRAM dans les zones de turbulence...Essai de réflexion et de propositions ».
- Michel P. 1990. La dégradation des paysages au Sénégal , in séminaire sur la "Dégradation des Paysages en Afrique de l'ouest" pp 37-53
- Miehe S. 1991. Inventaire et suivi de la végétation dans les parcelles pastorales à Widou Thiengoly. Résultats des recherches effectuées de 1988 à 1990 et évaluation globale provisoire de l'essai de pâturage contrôlé après une période de 10 ans. GTZ, Widou/Göttingen, 108 p + annexes.
- Ndiaye A. 1999. Essai de quantification et d'identification des déterminants de la pauvreté à Dakar. Des concepts aux réalités. Thèse de doctorat en analyse économique. Panthéon Sorbonne.
- Niamir-Fuller M. 1998. « Un bref aperçu sur l'évolution de l'approche au développement pastoral en Afrique », 17 p, PNUD UNDO
- Nolan T., Connolly J., Sall C. 1995. « Dietary agreement between cattle, sheep and goats on semi-arid range under mixed grazing ». Proceedings of the Vth International Rangeland Congress, July 23-28, Salt Lake City, U.S.A., pp 397-398.
- North D.C.,1997. "The new institutional economics and third world development" in Harriss J., Hunter J., Lewis C.M. (ed): The new institutional economics and third world development. Routledge.
- Penning De Vries F.W.T., Djiteye M.A. 1991. La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressources naturelle. Pudoc, Wageningen, 525 p.
- Poidevin D., 1999. La carte moyen d'action, éditions ellipses, 199 pages

Pointing J. et Joeke S. 1991. « Les femmes dans les sociétés pastorales d'Afrique orientale et occidentale », IIED n°28.

Poissonet, J. & Touré, I.A., 1986. « Problématique pastorale du Ferlo sénégalais et éléments pour une stratégie d'aménagement et de gestion ». Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens - Fapis / Unesco

II-8 IMPACTS DE LA MOUSSON SUR LA SANTE

Jacques-André Ndione (CSE), Aldiouma Diallo (IRD), Ibrahima Mbaye (IRD), Chiekh M. Fadel Kébé (LPASF), Ousmane Ndiaye (IRI)

II-8-1 INTRODUCTION.

Le projet AMMA (*Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine*) est un programme de recherche international qui vise essentiellement à documenter la variabilité climatique et hydrologique sur la région ouest africaine selon une approche multi échelle et multidisciplinaire. Il cherche tout d'abord à améliorer notre compréhension de la mousson ouest africaine et de son impact sur l'environnement local et régional. Il va donc produire des connaissances qui permettront de relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, aux ressources en eau, au pastoralisme et à la sécurité alimentaire. En conséquence, il nous revient alors la nécessité de définir les stratégies appropriées.

Pour bien appréhender tous ces processus à travers une étude globale mais aussi transversale par rapport à une thématique comme la santé, AMMA s'ouvre naturellement à l'épidémiologie des maladies sensibles à la variabilité des facteurs environnementaux, notamment les maladies transmises par des vecteurs.

II-8-2 PROBLEMATIQUE.

Il y a une vingtaine d'années en effet, lorsque l'on parlait d'environnement, c'était pour évoquer la protection de la nature, les oiseaux mazoutés à la suite desastres pétroliers, les sols imprégnés de substances toxiques, éventuellement de la gêne occasionnée soit le bruit, soit par certaines odeurs. Les aspects relatifs à la santé ne sont apparus dans cette grande thématique que récemment et aujourd'hui, la santé humaine comme la santé animale font parties intégrantes des politiques d'environnement et il existe une profonde attente des populations dans ce domaine. Les liens entre environnement et santé sont indéniables. Selon l'OMS, les maladies liées à l'environnement sont responsables des $\frac{3}{4}$ des 49 millions de décès recensés chaque année sur la planète (Besancenot, 2000). C'est ainsi que les événements météorologiques extrêmes (pluies diluviennes, inondations, ouragans ...) surviennent certes en un laps de temps très court mais ont des conséquences sur la santé. La vulnérabilité aux répercussions sanitaires des aléas climatiques est bien plus grande dans les communautés démunies. Le climat joue un rôle important dans les maladies transmises par des vecteurs (moustiques, tiques, phlébotomes ou mouches) qui sont une grande cause de morbidité et de mortalité dans les pays tropicaux. Ces vecteurs à sang froid sont, en effet, sensibles aux effets du climat qui influent aussi sur leur abondance et leur répartition. Ces effets qui peuvent être, d'une part, directs, sont liés à la température, à la pluviométrie et aux vents, et d'autre part indirects, en agissant sur les plantes ou les animaux hôtes.

Le climat et les conditions environnementales fluctuent à toutes les échelles spatio-temporelles (Mann and Park, 1994 ; Tourre et al., 1998). Les fréquences clefs qui nous intéressent pour appréhender les mécanismes physiques du système couplé climat-santé, vont aussi du saisonnier aux tendances et changements climatiques, en passant par l'interannuel, le quasi-décennal (White et al., 2003), et le penta-décennal (Delworth and Mann, 2000). Les mécanismes physiques de ces signaux ne sont toujours pas bien compris, mais des techniques d'indentification de leurs phases pourraient aider à mettre en place des systèmes d'alerte précoce qui ont pour but non seulement de diminuer le risque mais aussi de prévenir les décideurs. *Par exemple la connaissance en amont des conditions thermiques de l'océan Atlantique pourra permettre la mise en place d'un système de prévision sur les*

précipitations en Afrique de l'Ouest, plus connu sous le vocable de prévision saisonnière. Mais pour le moment, le système reste balbutiant car selon Thomson et al (2002) si les données météorologiques sont si rarement utilisées par les services de la santé, c'est principalement parce que la discipline scientifique qui associe les conditions atmosphériques à la maladie n'est qu'à ses débuts et qu'il y a peu de professionnels soit de la santé, soit de l'agriculture ou encore de la météorologie qui soient capable de parler le même langage technique et de communiquer efficacement. Aujourd'hui, si l'on veut développer des systèmes d'information, de prévision et d'alerte précoce dans la thématique « Environnement-santé » pour lutter contre les épidémies, il faudra combler ce fossé.

On estime que d'ici à 2100, la température moyenne de la planète aura augmenté de 1 à 3,5°C (IPCC, 2001), avec pour corollaire une augmentation du risque d'extension de nombreuses maladies transmissibles (Epstein et al., 1998; Sutherst, 1998). De nombreux travaux suggèrent que le changement climatique risque d'induire une recrudescence des pathologies propagées par les insectes (Bouma et al., 1994; Colwell et Patz, 1998; Martens, 1998). Des études sur les arthropodes vecteurs et les modifications de leur répartition et de leur rôle sont menées en de nombreux pays (Reeves et al., 1994; Reiter, 2000). Les modifications de la température, des vents, des précipitations et de l'humidité auxquelles on peut s'attendre selon différents scénarii de changement climatique, ou modulation de variabilité naturelle, devraient affecter la biologie et l'écologie des vecteurs et des hôtes intermédiaires, et par conséquent le risque de transmission de maladies. Dans certains cas, des liens causaux directs avec des phénomènes climatiques naturels sont indiqués, en particulier avec ENSO (Hales et al., 1999; Kovats, 2000; Committee, 2001). Il faut remarquer aussi que ENSO peut-être modulé (fréquence et intensité) par des changements climatiques basses fréquences. Pour autant, la bibliographie ne prend pas en compte l'impact de la variabilité du climat sur la santé. Pourtant une réduction de 10% de l'humidité qui se reproduirait régulièrement chaque année, n'aurait pas le même impact si elle correspondait à une réduction de 50 % survenant une fois tous les cinq ans. C'est pourquoi une des perspectives de recherche du présent projet est l'étude de l'impact de la variabilité du climat.

En Afrique tropicale, plus exactement en Afrique de l'ouest il est assez difficile d'aborder les questions relatives à la variabilité du climat sans pour autant discuter de la mousson. En effet, la mousson africaine appartient au système couplé terre-océan-atmosphère dans un ensemble géographique particulier : basses latitudes-géométrie des côtes-orographie (Livre Blanc, 2001). Même si la variabilité interannuelle demeure importante, pour ce qui est des questions relatives à l'émergence de maladies, la variabilité intra saisonnière de la pluviométrie, à savoir l'organisation interne de la saison des pluies (Louvet et al, 2004; Ndione, 2004), donc de la mousson reste un élément fondamental, voire déterminant. En effet, le démarrage de la saison des pluies en Afrique de l'ouest est caractérisé par un déplacement vers le nord de la ZCIT dès le mois d'avril, lequel déplacement s'effectue assez rapidement en juin (Sultan et al., 2000; Le Barbé et al., 2001). Il correspondrait en fait à une transition entre deux régimes en état d'équilibre : un régime d'équilibre radiatif-convectif et un régime de circulation conservant la quantité de mouvement (Eltahir et Gong, 1996). La variabilité intra saisonnière est constituée d'une succession de phases actives/inactives d'environ 10 à 20 jours pendant la période de juillet à septembre, et des interactions avec les perturbations synoptiques d'Est semblent avoir lieu (Janicot et Sultan, 2001). Peut-on déterminer, par exemple, une quelconque relation qui existerait entre ces différentes phases de la mousson et l'apparition de maladies ?

La longue sécheresse qui a affecté le Sahel durant près de 30 ans a suscité un intérêt certain pour les études du climat de l'Afrique de l'Ouest. Nous considérons ici le climat comme la moyenne à long terme des conditions environnementales (atmosphère et biosphère). Puisque le climat implique des

processus de grande échelle, pour une étude au niveau local il faudrait d'abord considérer des échelles spatiales plus étendues (Gaye et al., 2000). Cette sécheresse a entraîné une réduction importante de la pluviométrie qui a été notée sur presque toute l'Afrique de l'Ouest, des côtes du Golfe de Guinée au Sahara. Mais les déficits les plus significatifs ont été notés dans les régions sahéliennes et soudaniennes. Elle est sans précédent, remarquable par sa sévérité, sa persistance, son ampleur et son extension (Sircoulon, 1990 ; Dione, 1996). Le Borgne (1988a) la qualifie d'exceptionnelle à cause de sa persistance et de son intensité si bien qu'elle autorise tous les superlatifs. Il poursuit en s'arrêtant sur quatre (4) années qui ont été particulièrement déficitaires :

- 1972, les isohyètes 100 et 500 mm descendirent respectivement au Ferlo et en Gambie ; la station de Dagana totalisa jusqu'à 80% de déficit ;
- 1977, d'intensité comparable à celle de 1972, la sécheresse n'affecte plus le nord seulement mais toute la zone côtière et ce jusqu'en Casamance ;
- 1983, année d'anomalies climatiques dans le monde entier a été ici celle des plus forts déficits ; les isohyètes 500 et 1000 mm se retrouvent respectivement en Gambie et sur la frontière avec la Guinée Bissau suite à la péjoration pluviométrique ;
- 1984, avec $219\text{m}^3/\text{s}$, le fleuve Sénégal atteint son niveau le plus bas (Le Borgne, 1988a).

Le déficit pluviométrique a été exceptionnellement long et accusé donc depuis le début des années 1970. Il a été marqué selon Ndong (1996), par :

- un raccourcissement de la saison des pluies ;
- une augmentation considérable des intervalles de sécheresse ou encore des pauses pluviométriques ;
- une modification dramatique de la fréquence et de l'intensité des précipitations.

Ce déficit pluviométrique se traduit inexorablement par un abaissement du niveau des nappes phréatiques, un tarissement des puits, une diminution considérable des écoulements et une réduction de la durée de vie des mares. Mais, il n'en demeure pas moins pour autant que les maladies liées à l'eau aient connu dans le même temps une baisse ... *Par exemple, l'épidémie sénégal-mauritanienne de FVR de 1987 est survenue au cours d'une période de déficit pluviométrique.* Dans le même temps, il n'en demeure pas moins que les cas de paludisme aient connu aussi une baisse ...

Deux maladies ont retenu notre attention, il s'agit du paludisme et de la méningite qui constituent des problèmes de santé publique.

II-8-3 OBJECTIFS DE L'ETUDE

II-8-3-1 Objectifs généraux

L'étude de la variabilité climatique va se concevoir dans une préoccupation des problèmes de santé à travers. Avant de développer les modèles, il est certes nécessaire de comprendre les liens entre la variabilité du climat, le flux de mousson, le cycle hydrologique et leur impact sur l'émergence de certaines maladies :

- d'abord à travers la poursuite de l'approfondissement de nos connaissances de la biologie et de l'écologie des vecteurs du paludisme ;
- ensuite, comprendre le couplage « ressource en eau (pluviométrie et eaux de surface), spécialement des mares », donc cycle hydrologique et épidémiologie du paludisme ;
- enfin, il faudra arriver à analyser et à modéliser la dynamique des populations de vecteurs, et les relations entre cette dynamique avec le climat et l'hydrologie ; et de coupler les modèles ainsi obtenus à des modèles de prévisions climatiques.

Il est une nécessité aujourd'hui de promouvoir une approche intégrée, multi-disciplinaire et multi-échelles, et qui est certainement la voie prioritaire à prendre en terme de prospective de recherche pour le futur, compte tenu de l'état de l'art actuel. S'appuyant sur les observations de terrain et toute une hiérarchie de modèles numériques, statistiques, bio-mathématiques, elle pourra profiter de la dynamique internationale AMMA et contribuer du même au développement de modèles d'alerte précoce. Les travaux menés au Sénégal depuis 2001 sur la FVR avec le projet Emercase (ACI « Télémédecine et Technologie de la Santé », Projet N°120, 2000-2002) ont ouvert la voie à cette approche et depuis lors cette même dynamique se poursuit.

II-8-3-2 Objectifs spécifiques

La présence de précipitations et d'humidité dans une ambiance chaude est une condition nécessaire mais pas suffisante à la survenue des cas de paludisme en Afrique sub-saharienne (Craig et al., 1999). L'augmentation des précipitations et la présence d'eau constituant des mares permanentes ou résiduelles favorisent les gîtes larvaires ce qui augmente la densité en vecteurs de type anophèle et, en retour, une augmentation des probabilités de contact et de transmission (Aguirre et al., 2002 ; Aron et al., 2001) ; l'augmentation des températures accélère le développement larvaire jusqu'à certains seuils où les températures trop importantes deviennent incompatibles avec la physiologie anabolitique des larves et des protozoaires, la fréquence des piqûres réduit le temps de maturation des parasites dans le corps de la femelle. La température et l'humidité relative basses augmentent les temps de digestion des repas de sang et de maturation des œufs (cycle gonotrophique). La transmission épidémique de la malaria à *Plasmodium falciparum* par *Anopheles gambiae* est limitée par une température de 16-18°C (à 22°C la transmission est endémique ou stable), et une pluviométrie moyenne de 80 mm par mois durant 5 mois de l'année. La notion de seuil doit donc être prise en compte pour la réalisation des scénarios d'impacts. De plus, Githeko et al. (2001) ont montré que les épidémies de paludisme étaient précédées par des anomalies positives sur les maximums 3-4 mois avant débouchant sur la mise au point de modèles de prévision. L'augmentation attendue des températures moyennes et de la fréquence des événements intenses pose aussi la question de l'impact du changement climatique sur la morbidité associée au paludisme (Lindsay et al., 1996 ; Githeko et al., 2000).

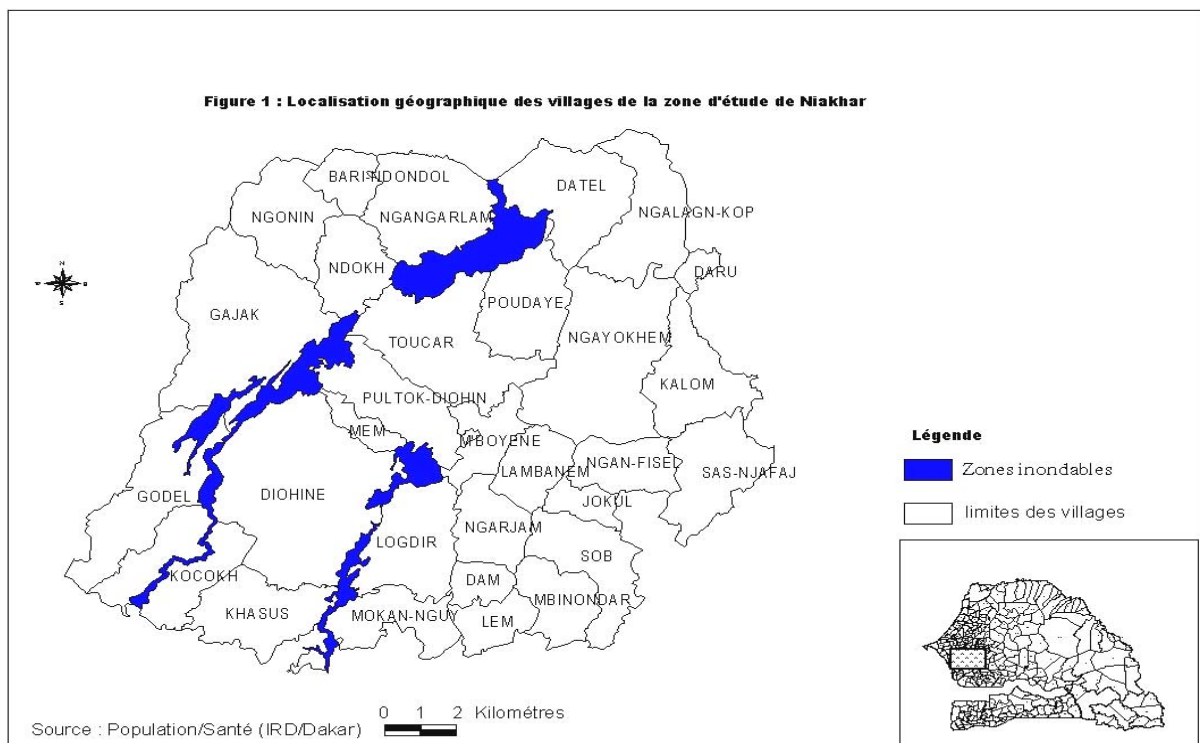
On peut citer entre autres :

- 1) l'amélioration de notre compréhension des liens entre dynamique de la mousson, variabilité de petite échelle de la pluie et cycle de l'eau va constituer donc le premier objectif ;
- 2) le second s'attache aux impacts sur la ressource en eau et les cycles épidémiologiques du paludisme dans une approche écophysiologique.
- 3) pour ce qui est de la méningite, il s'agira d'une part d'essayer de comprendre l'influence du climat sur les épidémies de méningite par la recherche d'indicateurs météorologiques sensibles sur le déclenchement de cette pathologie. D'autre part d'établir un seuil d'alerte précoce afin de prévoir les épidémies de méningite.

Une attention particulière sera accordée à l'analyse de l'évolution des précipitations, de leur intensité et leur fréquence mais surtout de celle des précipitations journalières extrêmes. Il en est de même pour les autres paramètres climatologiques tels que, la température de l'air, l'humidité relative, l'évaporation, l'insolation, le vent ... La détermination du déficit hydrique se fera à partir d'une analyse des bilans de l'eau.

II-8-4 SITE D'ETUDE

Niakhar est le nom d'une bourgade située à 150 km à l'Est de Dakar. Par extension, son nom a été donné à un ensemble de 30 villages couvrant une superficie de 200 km² (figure 1). La particularité de ce site par rapport au reste du monde rural sénégalais se trouve dans les enquêtes démographiques et épidémiologiques régulières qui y sont menées par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). D'abord pour 8 villages pendant les années 1960 et, sur l'ensemble des 30 villages depuis 1983 (Mbaye et al., 2004). Niakhar appartient au domaine climatique sahélien sénégalais situé entre les isohyètes 100 et 500 mm. Les précipitations sont liées essentiellement à la présence de la mousson pendant 3 à 4 mois. Le maximum de température intervient en mai ou juin (Sagna, 2000).



Des résultats encourageant ont été obtenus déjà sur les relations entre climat et santé à Niakhar. A une échelle interannuelle, Ndiaye et al (2001) ont montré la relation entre la mortalité palustre à Niakhar et les variabilités du climat. Au cours de la période 1984-1996, la variabilité des pluies du mois d'août est fortement liée au nombre de cas de décès attribué au paludisme durant les mois de août à septembre ($r=0.61$). Ils ont montré la corrélation existant entre la pluviométrie à un mois donné de la saison pluvieuse et la mortalité palustre observée au cours des deux mois qui suivent avec un décalage d'un mois. La relation devient faible avec un décalage de deux mois. Ce décalage est en accord avec les connaissances du cycle du parasite et des interactions parasite-homme-vecteur. Ils ont utilisé d'autres paramètres climatiques comme l'humidité et la température mais les relations sont beaucoup plus faibles.

Au cours de la campagne de mesure intensive AMMA on pourrait chercher à mieux comprendre l'influence de la pluviométrie sur les gîtes larvaires (superficie, durée de vie, nombre etc.). On pourrait utiliser les observations pour vérifier leur modèle. Et étendre cette étude sur d'autres zones où les données sur le paludisme existent mais les paramètres climatiques ne sont pas observés. A Niakhar où le paludisme constitue une priorité dans les recherches qui y sont menées, nous pouvons disposer des données (rétrospectives et prospectives) sur la morbidité (cas des dispensaires) et la mortalité (cas dans la base de données) palustres.

La situation sanitaire de la zone d'étude de Niakhar révèle aussi trois épidémies de méningite survenues respectivement en 1998, 1999 et 2000. En 1998, 65 cas de méningite ont été recensés dans le cadre du suivi de la morbidité entre janvier et mai contre 60 cas en 1999 et 28 cas en 2000 pour une population d'environ 30 000 habitants. En 1998 et 2000, les enfants âgés de 5 à 9 ans sont les plus touchés avec respectivement une incidence de 600 cas pour 100 000 habitants et 328 cas pour 100 000 habitants. Par contre en 1999, les enfants de 1 à 2 ans sont les plus affectés avec une incidence de 657 cas pour 100 000 habitants (Mbaye et al., 2004).

II-8-5 QUESTIONS POSEES

1. La variabilité intra saisonnière de la mousson est constituée d'une succession de phases actives/inactives d'environ 10 à 20 jours pendant la période de juillet à septembre, et des interactions avec les perturbations synoptiques d'Est semblent avoir lieu (Janicot et al., 2001). Peut-on évaluer par exemple une quelconque relation qui existerait entre ces différentes phases de la mousson et l'apparition de maladies ?
2. Si l'expression de la méningite dans la population diffère selon les années à Niakhar, existe-t-il des indicateurs météorologiques susceptibles d'influer de manière simple dans l'apparition de ces épidémies à Niakhar ?
3. Quelles évolutions peut-on prévoir en fonction de scénarii climatiques du type année humide, année sèche ou encore de changement global ?
4. Quelles mesures d'aménagement du territoire et plans de prévention, quelles mesures de lutte sont-elles susceptibles d'être efficaces pour empêcher la survenue de crises sanitaires graves ?

II-8-6 METHODOLOGIE

Tâche 1. Etude du milieu

Tâche 2. Analyse de l'impact de la variabilité climatique

Tâche 3. Analyse et validation des mécanismes épidémiologiques

Tâche 4. Modélisation des mécanismes épidémiologiques

Tâche 5. Elaboration d'index bioclimatiques prédictifs

II-8-7 COLLABORATIONS EXTERIEURES

S2E « Surveillance Spatiale des Epidémies » (Médias-France, ENVL, CNES)
Institut Pasteur Dakar

II-8-8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aguirre, A.A., Ostfeld, R.S., Tabor, G.M., House, C. & Pearl, M.C., 2002, Conservation Medicine. Ecological health in practise, Oxford University Press, Oxford, UK.

Aron J .L. & Patz, J.A., 2001, Ecosystem change and public health. A global perspective. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA

Anonyme, 2001, La mousson oust africaine et ses composantes. Etat des connaissances et proposition de projet. Livre Blanc, 75p

Besancenot J.P., 2000, Environnement et santé, Actes du, Communication personnelle FIG 2000 Géographie et Santé, Reims

Bouma, M. J., H. E. Sondorp and H. J. Van der Kaay, 1994, Health and climate change, *The Lancet*, 343: 302.

Colwell, R. R. and J. A. Patz, 1998, Climate, Infectious Disease and Health. Washington, American Academy of Microbiology.

Committee on Climate, Ecosystems, Infectious Diseases, and Human Health, Board on Atmospheric Sciences and Climate (2001). Under the Weather: Climate, Ecosystems, and Infectious Disease, National Research Council.

Craig M.H., Snow R.W., Le Sueur D., 1999, A climate-based distribution model of malaria transmission in sub-Saharan Africa, *Parasitology Today*, 15: 105-111.

Delworth T. L., Mann M. E., 2000, Observed and Simulated Multidecadal Variability. *Climate Dynamics*, Springer-Verlag (eds), v.16, pp. 661-676.

Dione O., 1996, Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, Th. Doct. Univ. Lyon III, 415p.

Eltahir E. A. B., Gong C., 1996, Dynamics of wet and years in West Africa, *J. Climate*, 9, 1030-1042

Epstein, P. R., H. F. Diaz, S. A. Elias, G. Grabherr, N. E. Graham, W. J. M. Martens, E. Mosley-Thompson and J. Susskind, 1998, Biological and physical signs of climate change focus on mosquitoes-born diseases, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 78: 409-417.

Gaye A. T., Ndione J. A., Citeau J., 2000, Les modifications du climat du Sénégal, In *Atelier International sur la Séquestration du Carbone dans les sols*, pp 42-43.

Githeko A. K. and Ndegwa W., 2001, Predicting malaria epidemics in the Kenyan highlands using climate data: a tool for decision makers. *Global change & Human Health*, Vol. 2, 1 (2001) 54

Githeko A K., Lindsay S.W., Confalonieri U, and Patz J.A., 2000, Climate change and vector borne diseases: a regional analysis, *Bulletin of the World Health Organization*, 78: 1136-1147.

Hales, S. and al., 1999, El Nino and the dynamics of vector-borne disease transmission, *Environmental Health Perspectives*: 107.

IPCC, 2001, Climate change 2001: synthesis report. Cambridge, Cambridge University Press.

Janicot S., Sultan B., 2001, Inter-seasonal modulation of convection in the West African monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 523-526

Kovats R. S., 2000, El Nino and human health, *WHO Bull.* 78: 1127-1135.

Le Barbé L., Lebel T., Tapsoba D., 2001, Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990, *J.Climate*, In print

Le Borgne J, 1988, La pluviométrie au Sénégal et en Gambie, 86p.

Lindsay S.W, Birley M.H., 1996, Climate change and malaria transmission., *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 90:573-88.

Louvet S., Roucou P., Fontaine B., 2004, *Phases actives et pauses pendant l'installation de la mousson ouest-africaine à travers le fichier de pluviométrie pentadaire CMAP (1979-2001)*, Communication personnelle Atelier de modélisation en épidémiologie, Cargèse, 8 -14 mars 2004

Mann, M.E., Park, J., 1994, Global scale modes of surface temperature variability on interannual to century time scales, *J. Geophys. Res.*, 99, 25819-25833.

Mbaye I., Handschumacher P., Chippaux J. P., Diallo A., Ndione J. A., Paul P., 2004, Influence du climat sur les épidémies de méningite à Niakhar (Sénégal) de 1998 à 2000, *Environnement, Risques et Santé*, 3, 4 : 219-226

O. Ndiaye, JY. Le Hesran, JF. Etard, A. Diallo, F. Simondon, MN. Ward et V. Robert. Variations climatiques et mortalité attribuée au paludisme dans la zone de Niakhar, Sénégal, de 1984 à 1996. *Cahiers Santé*, 2001, 11: 25-33.

Ndione J.A., Diop M., Mondet B., Diop C., Dacosta H., 2004, *Emergence de la fièvre de la vallée du Rift au Sénégal et variabilité intra saisonnière de la pluviométrie*, Communication personnelle Atelier de modélisation en épidémiologie, Cargèse, 8 -14 mars 2004.

Ndong J-B., 1996, L'évolution du climat du Sénégal et les conséquences de la sécheresse récente sur l'environnement. Th. Doct. Univ. Lyon III, 501p., 89 fig., 104 tab.

Reeves, W., J. Hardy, W. Reisen and M. Milby, 1994, The potential effect of global warming on mosquito-borne arboviruses, *J. Med. Entomol.* 31: 323-332.

Reiter P., 2000, Climate change and mosquitoes-borne diseases, *Environ. Health Perspect*, 109 (suppl 1): 141-161.

Sagna, 2000, Le climat du Sénégal. In : Atlas du Sénégal : 16-19.

Sircoulon J., 1990, Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. Comportement des cours d'eau tropicaux, rivières et des lacs en zone sahélienne, WMO/TD 380, 87p.

Sultan B., Janicot S., 2000, Abrupt shift of the ZCIT over West Africa and intra-seasonal variability, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3353-3356

Sutherst, R. W., 1998, Implications of global change and climate variability for vector-borne diseases: generic approaches to impact assessments, *Int. J. Parasitol.* 28: 935-945.

Thomson M. C., Stephen J. C., 2002, Le Paludisme Systèmes de Pré-Alerte, 84p.

Tourre, Y. M., Rajagopalan B., Kushnir Y., 1998, Dominant patterns of climate variability in the Atlantic Ocean region during the last 136 years, *J. Clim.* 12(8): 2285- 2299.

White, W.B., Y.M. Tourre, M. Barlow, and M. Dettinger, 2003, A delayed action oscillator shared by biennial, interannual, and decadal signals in the Pacific basin, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, n°. C3, 3070, doi: 10.1029/2002JC001490.

II-8-9 CHRONOGRAMME

	Activités
An 1	<p>Revue documentaire</p> <p>Entomologie campagne mensuelle (juillet, août, septembre, octobre, novembre) de capture de moustiques</p> <p>Hydrologie - instrumentation des mares par des Thalimèdes au mois de juin ; - 5 missions de collecte des données (juillet, août, septembre, octobre et novembre)</p> <p>Climatologie - installation des 3 stations météo automatique <i>Campbell scientific</i> ; - 5 missions de collecte des données (juillet, août, septembre, octobre et novembre) - formation en techniques statistiques</p> <p>Imagerie satellitaire - achat et traitement des images satellitaires (2 images SPOT 5/saison des pluies) - 2 missions de validation - formation en télédétection (traitement des images)</p>
An 2	<p>Revue documentaire</p> <p>Entomologie campagne mensuelle (juillet, août, septembre, octobre, novembre) de capture de moustiques</p> <p>Hydrologie - instrumentation des mares par des Thalimèdes au mois de juin ; - 5 missions de collecte des données (juillet, août, septembre, octobre et novembre)</p> <p>Climatologie - installation des 3 stations météo automatique <i>Campbell scientific</i> ; - 5 missions de collecte des données (juillet, août, septembre, octobre et novembre)</p> <p>Imagerie satellitaire achat et traitement des images satellitaires (2 images SPOT 5/saison des pluies) 2 missions de validation</p>
An 3	<p>Entomologie campagne mensuelle (juillet, août, septembre, octobre, novembre) de capture de moustiques</p> <p>Hydrologie - instrumentation des mares par des Thalimèdes au mois de juin ; - 5 missions de collecte des données (juillet, août, septembre, octobre et novembre)</p> <p>Climatologie - installation des 3 stations météo automatique <i>Campbell scientific</i> ; - 5 missions de collecte des données (juillet, août, septembre, octobre et novembre)</p> <p>Imagerie satellitaire - achat et traitement des images satellitaires (2 images SPOT 5/saison des pluies) - 2 missions de validation</p> <p>Conférence, Publications (participation à des conférences, séminaires et ateliers)</p>

II-8-10 BUDGET

	An 1	An 2	An 3
Entomologie campagne de capture de moustiques	3 000 000	3 000 000	3 000 000
Hydrologie - achat de Thalimèdes - mission de collecte des données	2 500 000 350 000	350 000	350 000
Climatologie - achat de 3 stations météo automatique <i>Campbell scientific</i> ; - mission de collecte des données	9 000 000 550 000	550 000	550 000
Imagerie satellitaire achat d'images satellitaires (2 images SPOT 5/saison des pluies) Mission validation Consommables	14 432 000 925 000 1 500 500	14 432 000 925 000 1 000 000	14 432 000 925 000 1 000 000
Documentation (commande de revues scientifiques)	500 000	500 000	500 000
Formation (stage)	2 500 000	2 500 000	
Conférence, Publications (participation à des conférences, séminaires et ateliers)		1 700 000	1 700 000
TOTAL	35 257 500	23 807 000	21 307 000

II-9 IMPACT DE LA MOUSSON SUR LES CULTURES AU SENEGAL

Mbaye DIOP (PI) (LERG/ISRA), Omar DIOUF (CERAAS/ISRA), Bamar DIAGNE (DMN), Tidiane SANE (LERG),

II-9-1 INTRODUCTION, CONTEXTE ET JUSTIFICATIFS

Plusieurs études ont montré la forte variabilité et la baisse pluviométrique observée en zone sahélienne et soudanienne depuis la fin des années 60 (J. P. Carbonnel et P. Hubert, 1985 ; S. Janicot, 1992 ; S.E. Nicholson et I. Palao, 1993 ; V. Moron, 1994-a). Or, il s'avère que 96% des cultures sont pratiquées pendant la saison de mousson, soit directement (cultures pluviales), soit indirectement (cultures de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal ou cultures maraîchères dans la zone des Niayes).

Face au risque d'insécurité alimentaire lié aux risques climatiques, beaucoup d'efforts ont été consentis par la recherche dans le cadre de l'amélioration de la résistance des cultures ou leur adaptation au contexte de variabilité et de baisse pluviométrique. Dans le même temps, la politique agricole adoptée par les pouvoirs publics s'est davantage orientée vers la diversification des cultures, avec notamment la revalorisation des cultures vivrières.

Ce travail tente de caractériser l'impact de la mousson sur les cultures et sur les potentialités d'une diversification offertes par les régions du Sénégal.

II-9-1-1 Problématique

En zone sahélienne, l'agriculture est étroitement dépendante des aléas du climat (mise en place et dynamisme du flux de mousson, position ZCIT). Depuis la fin des années 60, le Sahel et le Sénégal en particulier, enregistre des périodes de sécheresses récurrentes, marquées par des totaux pluviométriques inférieurs à ceux des années 1950 et une mauvaise distribution spatiale et temporelle des pluies (Morel, 1991). De nombreux auteurs ont mis en évidence le lien entre les anomalies de températures de surface dans l'Atlantique Nord et Sud, le phénomène planétaire ENSO et la dynamique des précipitations en Afrique (Camberlin et Diop, 1999). Ces anomalies pluviométriques peuvent se traduire par des baisses de la production en grain de 60 % et entravent par conséquent le développement social et économique des pays sahéliens. Ainsi au cours de ces dernières décennies, on assiste à une dégradation des conditions de l'environnement écologique, sociale et sanitaire dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique subsaharienne. Cette détérioration fragilise de manière persistante les capacités de production agricole de ces pays.

La sécurité alimentaire constitue de ce fait l'un des principaux objectifs de la recherche et du développement agricoles au Sénégal. Un appui efficace des autorités publiques, des ONG et des bailleurs de fonds aux producteurs nécessite avant tout un diagnostic rapide et précoce de la situation de la campagne agricole. La mise à disposition des informations sur les cultures concourt à une meilleure compréhension des effets du climat et à la mise en place d'un système d'aide à l'identification et à la délimitation précoces des zones de calamités ou d'excédents alimentaires.

II-9-1-2 Etat des connaissances

Les modèles de simulation de l'environnement agricole peuvent répondre à diverses demandes des utilisateurs : analyse prospective des changements climatiques, gestion des risques (Affholder, 1997), protection de l'environnement, prévisions des récoltes et planification de la politique agricole et alimentaire d'un pays. Pour les zones sahéliennes, les modèles précurseurs basés sur une estimation du bilan hydrique des cultures en cours de cycle, ont été développés au début des années 80. Le modèle SARRA (Système d'Analyse Régional des Risques Agroclimatiques) simule des indicateurs hydriques de production (IRESF ou indice de rendement espéré), basés sur la consommation en eau réelle et maximale et par conséquent l'état de confort hydrique de la plante en relation avec les techniques culturales. D'autres approches ont été développées pour la modélisation des rendements réels basée sur les consommations réelles et maximales d'eau et la productivité potentielle des cultures.

Dans les zones où les flux hydriques sont les plus déterminants, la modélisation du bilan hydrique et la mise en relation de ses paramètres avec la production aboutit à une estimation bien adaptée des rendements à des échelles allant de la parcelle à la région.

Le système de prévision saisonnière des rendements fondé sur le logiciel DHC qui s'appuie également sur le bilan hydrique (diagnostic hydrique des cultures ; Doc Agrhymet, 1990) a été aussi développé par l'AGRHYMET et le CIRAD. Ce système fournit des cartes de rendements prévisionnels du mil. Les données pluviométriques en cours de saison sont obtenues à l'aide d'un générateur de pluies aléatoires qui utilise la télédétection (analyses des nuages à sommet froids) et un réseau restreint de stations pluviométriques.

Le modèle Arabhy constitue la première génération de modèles semi-déterministes développés par le CERAAS. Il ajoute à la simulation du bilan hydrique des cultures, celles des réactions de la plante aux stress hydriques. Ce modèle estime en fin de cycle la production potentielle. Associé à un dispositif de collecte de données de terrain et à un module d'auto-paramétrisation, il estime également la production réelle de l'arachide.

Cette première génération de modèles paramétrés pour les zones soudano-sahéliennes, utilise en données d'entrée une base de données parcelle sur le climat, le sol et les cultures. Ces modèles sont, en effet, assez simples sans module de bilan carboné ni une prise en compte de la notion de densité du peuplement. Cependant, lorsque la pluviométrie n'est pas le seul facteur limitant de la production, les flux radiatifs modulés par les flux hydriques constituent l'élément fondamental du processus de croissance et de productivité des cultures.

C'est ainsi que le modèle SARRA a été amélioré pour évoluer vers un modèle semi-déterministe, SARRAH. Ce dernier fait intervenir les effets de la température et de la radiation solaire sur la production. La croissance est fonction de l'efficacité de conversion de la lumière interceptée en matière sèche.

De plus en plus, les différents modèles présentés sont associés à des systèmes d'informations pour le choix des variétés et des calendriers culturaux, le suivi des cultures, la cartographie des rendements et la détermination des zones de calamités climatiques (Annerose, 1996; Boggio et al, 1999).

II-9-2 OBJECTIFS

II-9-2-1 Objectifs généraux

Les objectifs globaux de ce projet sont de contribuer à la mise en place d'un système amélioré de diagnostic de l'impact de la mousson en agriculture notamment sur la croissance, l'alimentation en eau, la productivité et la diversification des cultures.

II-9-2-2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de ce projet sont :

- développer et valider des modèles génériques sur les autres cultures (maïs, sorgho, arachide, niébé...) céréales à partir des résultats obtenus par la recherche agricole au Sénégal sur la base de données existantes ou fournies par les expérimentations prévues à cet effet;
- redimensionner et paramétrer un réseau national de collecte de données agricoles permettant de fournir à partir d'un nombre de sites plus ou moins limités, une information complète et fiable sur les conditions de développement des cultures, leur diversité et la production agricole au cours de l'hivernage;
- déterminer le potentiel de diversification offert par chaque région ;
- élaborer un système d'information et de gestion de l'impact de la mousson sur l'agriculture ;
- et produire des informations météorologiques permettant de mieux gérer l'activité agricole.

II-9-3 METHODOLOGIE ET PLAN DE RECHERCHE

Les activités du projet s'articulent autour des domaines suivants :

- expérimentations en station et enquête en milieu paysan sur le comportement des cultures sous diverses conditions d'alimentation en eau (alimentation hydrique optimale et limitante);
- modélisation (calibrage, validation et test de sensibilité) de la croissance et de la productivité des principales cultures du Sénégal;
- enquêtes agricoles sur l'état de la diversité des cultures ;
- zonage des potentialités agroclimatiques du Sénégal ;
- élaboration d'un système de gestion, d'exploitation et d'organisation de bases de données attributaires spatialisées associé à un SIG;

II-9-4 ACTIVITES

II-9-4-1 Expérimentations en milieu semi-contrôlé (station)

Les expérimentations conduites en station permettront de déterminer le développement et la production des espèces comme le sorgho, le maïs, l'arachide et le niébé), cultivées en conditions d'alimentation hydrique optimale (production potentielle) et plus ou moins limitantes (productions réelles). les mesures et observations porteront sur des paramètres bioclimatiques (pluviométrie, température, humidité relative, vitesse du vent, demande évaporative, radiation globale), obtenus à l'aide d'une station météorologique, sur des paramètres agro-morpho-phénologiques (dates levée,

montaison, épiaison floraison formation des grains et maturité), sur la mesure de la surface foliaire (planimétrie et LAI 2000) suivi du taux de couverture, de l'accumulation et la répartition de la biomasse sèche aérienne au cours du cycle cultural (tiges, feuilles, épis, grains), le suivi des organes souterrains (poids secs racines, longueur du pivot et de la résistance à la pénétration des racines par pénétrométrie). En station, l'état hydrique du sol (méthodes tensio-neutroniques), la consommation en eau de la plante, la transpiration foliaire et la conductance foliaire (porométrie) seront suivis. A la récolte, les rendements en matière sèche feuilles, tiges épis, grains seront déterminés.

II-9-4-2 Expérimentations en milieu réel

Les informations à collecter en milieu réel porteront sur la pluviométrie journalière à partir de postes installés en parcelles paysannes ou des postes de la Direction de l'Agriculture. Les postes synoptiques de la Météorologie Nationale et les postes agroclimatiques de l'ISRA, les plus proches des sites d'essai, alimenteront également la base de données climatiques par la fourniture de données sur la radiation, la température, l'hygrométrie, le vent. Le suivi agronomique portera également sur les dates de semis, les variétés emblavées, les densités et la récolte. La mesure de l'indice de surface foliaire et le taux de couverture permettra d'apprécier l'état de développement des cultures. La prise en compte de l'impact des effets de différentes techniques culturales permettra d'estimer la production réelle paysanne par un calage de l'efficacité de la conversion de la lumière en biomasse. En effet, les modèles agronomiques simulent plutôt le rendement potentiellement atteignable.

II-9-4-3 Développement de modèle de croissance et de productivité des cultures

Les données collectées constitueront des référentiels pour le calibrage et la validation du modèle SARRAH. SARRAH est un modèle fondé sur l'assimilation du carbone selon trois processus : l'interception du rayonnement absorbé par la surface foliaire, la conversion du rayonnement intercepté en matière sèche et la répartition de cette biomasse en feuilles, tiges, racines, grains selon les besoins de croissance. A partir de la maturation, la répartition de biomasse s'oriente en priorité vers les grains au détriment des feuilles. A ce stade, la formation du grain répond au principe de compétition entre l'offre (gain journalier de biomasse) et la demande (croissance des grains) suivant un potentiel génétique de la plante.

La contrainte hydrique considérée comme un frein à l'accroissement de biomasse est traduite par l'indice de satisfaction hydrique de la plante (Tr/Tr_{pot}). Les besoins en eau (K_c) de la plante résulte de son état de développement foliaire (LAI) et racinaire pondéré par un coefficient de stress hydrique du sol. Sarra_H comprend un module phénologique géré par le temps thermique sauf pour la phase sensible à la photopériode.

La mesure de la validité des modèles, c'est-à-dire la conformité entre valeurs calculées et observées, pour les principales sorties du modèle est réalisée en utilisant l'erreur quadratique moyenne de prédiction ou RMSE (Willmott, 1982). RMSE est la racine de la moyenne de la somme des carrés des écarts entre données prédites (P) et observées (O) pour un nombre d'individu n . $RMSE = [(\sum(O-P)^2 / n)]^{0.5}$. RMSE permet de mesurer les performances d'un modèle.

II-9-4-4 Enquêtes agricoles

IL s'agit d'élaborer un questionnaire à administrer aux paysans, de façon identifier, pour chaque région, le type de diversification culturale pratiqué (variété, mode d'exploitation, production, raison

de leur abandon).

II-9-4-5 Zonage agroclimatique

Le zonage agroclimatique permet de déterminer les potentialités offertes par un espace donné. Il intègre des variables climatologiques (pluie, Eto), culturelles (besoin en eau, longueur de cycle) et pédologiques (type de sol, réserve utile). Des modèles agroclimatiques seront confrontés pour identifier celui qui donne les meilleurs indices agroclimatiques permettant de réaliser un zonage qui tient compte de tous les paramètres mentionnés précédemment.

II-9-4-6 Gestion de données et SIG

Certains processus du climat (pluie, évaporation, infiltration...) ont un grand impact à l'échelle locale. La prise en compte de ces processus à l'échelle régionale ou globale atténue leur impact à l'échelle locale. En effet, il existe une très forte variabilité intra-village du rendement agricole, ce qui nécessite un couplage des modèles agronomiques et des SIG à travers une analyse géostatistique.

Pour ce faire, les sorties des modèles agroclimatiques seront exportées vers un outil de SIG. Une base de données sera donc élaborée, soit directement sous Arc View en partant des objets déjà créés (parcelles, champs, villages, communautés rurales), soit sous Access, auquel cas un modèle conceptuel de base de données sera mis en place.

Les résultats seront traités à l'échelle des unités administratives afin d'assurer une meilleure gestion du risque climatique par les collectivités locales et les producteurs.

II-9-5 OUTILS D'INFORMATION SPATIALE SUR LA MOUSSON

II-9-5-1 Le Front Inter tropical comme indicateur de début de saison des pluies

Le front Intertropical (FIT) est une ligne qui représente la limite nord de la mousson en surface. Les paramètres météorologiques comme la direction du vent, l'humidité de l'air, la température du point de rosée entre autres, permettent de déterminer la position de cette ligne. L'information sur la position latitudinale du FIT et, donc, les différentes zones sous influence de la mousson, constitue pour les agriculteurs et producteurs, un indicateur de l'imminence de la saison culturale en terme de préparation des sols (défrichage, brûlis..), de mise en place des intrants agricoles et des semences ... L'information consistera à diffuser quotidiennement les fluctuations du front de mousson et des avis et conseils agrométéorologiques y afférents à des heures d'écoute définies au préalable, en langues compréhensibles par les agriculteurs et producteurs et de préférence en langues locales..

Il a été démontré au Sahel en général et au Sénégal en particulier, que les opérations de semis en humide des différentes cultures (arachide, maïs, sorgho, coton..) peuvent constituer un gage de réussite de la saison culturale. La position latitudinale du FIT sur le Sénégal et son décalage d'environ 150 à 300 km par rapport aux premières chutes de pluie dans une zone donnée d'une part, et l'analyse fréquentielle de la pluviométrie de début de saison, d'autre part, vont permettre de déterminer les périodes optimales des chances de réussite des opérations de semis en humide. Le critère retenu pour déterminer les périodes optimales de réussite de semis au Sénégal, est l'enregistrement d'une pluie de 15 à 20 mm recueillie sur 3 jours consécutifs après le 1^{er} mai sans période sèche supérieure à 7 jours dans les 30 jours qui suivent (Svakumar, 1990 ; Gueye et Sivakumar, 1992,). Ce critère retenu à partir de l'analyse des données pluviométriques historiques et des fluctuations du front de mousson, a pour objectif d'éviter les faux départs qui constituent une contrainte majeure à la réussite des semis en

humide. Plusieurs tentatives de définition de la période optimale de début de la saison culturale ont été proposées par Benoît et al (1977), pour le Sénégal avec souci majeur d'éviter les faux départs dus aux fréquentes pauses pluviométriques constatées aux Sahel durant la phase d'installation de la mousson. Il s'agira durant cette phase d'installation de la mousson, de donner des indications sur les périodes optimales de réussite des semis en humide.

II-9-5-2 Information sur l'impact de la mousson sur la croissance des différentes cultures

II-9-5-2-1 Phase d'installation de la mousson

La période qui va de mai à juillet constitue pour le Sénégal, la période d'installation de la mousson entre les latitudes 12° et 16°N avec les mouvements caractéristiques du FIT selon un gradient sud-nord et les perturbations mobiles qui lui sont associées. Or cette période d'installation de la mousson correspond à celle très sensible des opérations de semis en humide dont la réussite est capitale pour la production, mais surtout la période juvénile de croissance. C'est durant cette période juvénile de croissance que les jeunes pousses sont soumises à un risque de stress lié à l'instabilité de la mousson. Les pluies d'installation de la mousson au Sahel en général sont sous forme d'averses pluvio-orageuses qui tombent sur une surface encroûtée rendant difficile la levée et favorisant les phénomènes de ruissellement superficiel.

II-9-5-2-2 Phase de consolidation de la mousson

Cette période couvre les mois de juillet, d'août et de septembre pour la partie australe du pays et août-septembre pour la moitié nord. Elle correspond à la croissance des cultures pendant laquelle la fréquence élevée des pauses pluviométriques peut provoquer un stress hydrique et la baisse des rendements.

II-9-5-2-3 Information sur la prévision pluviométrique

Il s'agira, à partir des prévisions météorologiques à court terme (24 à 72 heures), des résultats d'analyse de la fréquence des périodes sèches (mai à juillet) et des résultats du bilan hydrique, de fournir une information sur les dates optimales de démarrage et de sarclages, pour atténuer la compétition avec les mauvaises herbes, ainsi que les dates optimales d'épandage de l'urée et des engrais.

Il s'agira aussi de valoriser les résultats des prévisions pluviométriques saisonnières fournies sous une forme qualitative :

- humide ou supérieure à la moyenne pour qualifier une saison des pluies excédentaire,
- moyenne ou normale pour une saison des pluies normale ;
- sèche ou déficitaire, inférieure à la moyenne pour qualifier une mauvaise saison des pluies.

Ce type d'information est un outil d'aide aux choix stratégiques et options suivantes :

- choix de la variété culturale adaptée à la prévision saisonnière (cycle court, moyen, long, résistance aux conditions pédoclimatiques)
- choix des semences (sélectionnées, hybrides, autres...)
- investissements en intrants (engrais, urée, pesticides...)

Si les bons choix sont effectués à partir des résultats de la prévision saisonnière, ils permettront d'optimiser les rendements attendus en fin de campagne.

II-9-6 RESULTATS ATTENDUS

Le travail proposé vise à améliorer les systèmes prévisionnels de la production des cultures céréalières au Sénégal. Cette démarche pluridisciplinaire qui associe la bioclimatologie, l'agronomie, l'agrophysiologie et la géomatique est basée sur la mise au point et l'exploitation de modèles adaptables aux objectifs d'analyse des impacts du climat à l'échelle locale et de suivi des cultures (zonage par rapport au choix des espèces et variétés-types, densité et dates de semis...). Autrement, le projet devrait permettre de fournir des informations sur la mise en place de la campagne agricole (dates de semis, phénologie, état de développement), des estimations de l'effet du climat et de certaines pratiques culturales sur le développement et la productivité des cultures, les possibilités offertes par les régions pour la diversification des cultures, des informations météorologiques pour aider les producteurs à mieux conduire les opérations culturales.

II-9-7 BUDGET

Rubriques	Montant
Investissements	
Equipement :	3 000 000 F CFA
Fonctionnement	
Main d'œuvre temporaire	
Carburant	5 250 000 F CFA
Frais de mission sur place	2 000 000 F CFA
Frais d'entretien véhicule	4 000 000 F CFA
Fournitures diverses	500 000 F CFA
Logiciel SIG	2 500 000 F CFA
Téléphone, fax, etc	7 000 000 F CFA
voyages	1 000 000 F CFA
perdiems	2 000 000 F CFA
Frais de gestion	1 400 000 F CFA
	500 000 F CFA
Total	29 150 000 F CFA

II-9-8 CONTRIBUTION DES PARTENAIRES

Ressources humaines

2 chercheurs géographes – climatologues

1 chercheur physiologie végétal

2 Ingénieurs agro-météorologie

Ressources matérielles

Locaux et matériels informatiques (ordinateurs et programmes de modélisation de la croissance et de la consommation en eau des cultures)

Références bibliographiques

- Carbonnel J. P. et P. Hubert, 1985 : *Approches statistiques des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'ouest*. Symposium « Changements Globaux en Afrique », INQUA, Dakar, pp. 199-202.
- Janicot S., 1992 : *Spatio-temporal variability of West African rainfall. Part I : Regionalizations and typings*. J. Climate, 5, 5, Lancaster, USA, pp. 489-497.
- Nicholson S.E. et I. Palao, 1993 : *A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel ; Part I : Characteristics of rainfall fluctuations*. Int. J. Climatol., 13, pp. 371-389.
- Moron V., 1994 : *Variabilité des précipitations en Afrique au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface des océans et la dynamique de l'atmosphère*. Thèse, Université de Bourgogne, Dijon, 2 tomes, 224 p.
- Morel R., 1992: *Atlas agroclimatique des pays de la zone du CILSS. Cartes de bilans hydriques des cultures*, Programme Agrhymet, Niamey, 7 volumes
- Camberlin P. et Diop M.: 1999 : Inter-relationships between groundnut yields in Sénégal, interannual rainfall variability and sea-surface temperatures. *Theoretical and Applied Climatology*, pp. 163-191
- Affholder, 1997: *Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semi arid regions*. Field Crops Research, pp. 1-15.
- Boggio D., Sarr B., Roy Macaukel H., 1999 : Outils et méthodologies pour le suivi des cultures et la prévision agricole en zones sèches. Cas du département pilote de Diourble, Sénégal. CERAAS/ISRA, Dakar, 26 p.
- Willmott, 1982
- Sivakumar M. V. K., 1990 : *Exploiting rainy season potential from the onset of the rain in the Sahelian zone of West Africa*. Agricultural and Forest Meteorology, 51, Patancheru (Inde), pp. 321-332.
- Gueye M. et Sivakumar M.V.K. : 1992 : *Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date des pluies au Sénégal*. Niamey, ICRISAT, 42 p.
- Benoît P., 1977 : *The start of the growing season in Northern Nigeria*. Agricultural Meteorology, 18, pp. 91-99

II-10 GESTION DURABLE DES RICHESSES NATURELLES LITTORALES ET CÔTIÈRES :

Le littoral, région clef du développement économique pour les 30 prochaines années

Pr Alioune KANE (PI), Département Géographie/UCAD, Chaire UNESCO, ...

La concentration des populations sur la zone littorale est un fait avéré à l'échelle mondiale. D'après les estimations des Nations Unies, 60 % de la population mondiale du début des années 90 vivait à moins de 50 km des côtes, on en prévoit 75 % en l'an 2025, soit une croissance de 1,5 % par an pour les prochaines décennies (Goldberg, 1994). Au Sénégal, la moitié de la population est côtière avec des densités 5 fois plus importantes que dans l'intérieur.

La richesse et la diversité des ressources naturelles jouent un rôle essentiel dans cette concentration des populations humaines sur les franges côtières. Ainsi, au Sénégal les deux principaux piliers de l'économie que sont la pêche et le tourisme sont des activités littorales et côtières. De nombreuses autres activités souvent de grande importance économique se partagent l'usage des richesses et des espaces littoraux et côtiers : transports, agriculture, élevage, industrie, loisir, plaisance, pisciculture, crevetticulture, ostréiculture, salines, mines, foresterie... Les zones côtières sont donc le théâtre d'une forte dynamique économique et sociale.

Néanmoins, la concentration des activités humaines sur cette frange étroite et fragile n'est pas sans poser de nombreux problèmes de durabilité. Les atteintes environnementales concernent l'altération des écosystèmes, l'empoisonnement des milieux et la surexploitation des espèces. Actuellement ces risques existent au Sénégal et menacent la durabilité du développement. La surexploitation des stocks marins, l'altération des milieux sédimentaires côtiers, les pollutions urbaines et industrielles excessives sont des exemples des dérives observées depuis quelques années.

II-10-1 LE LITTORAL : UN NOUVEL OBJET DE RECHERCHE ET DE GESTION

Ce n'est que récemment que le littoral est progressivement devenu un objet d'étude et de gestion. Lorsqu'on s'est aperçu que la multiplication des activités dans ces régions était cause de difficiles problèmes de préservation. L'Agenda 21 (chapitre 17) prenant acte de la généralisation des problèmes de dégradation des richesses naturelles côtières, propose un cadre de protection des milieux et de conservation des ressources par la promotion d'une gestion adaptée à un développement économique durable des zones côtières.

Il apparaît rapidement que les problèmes ainsi posés ne peuvent être résolus par une démarche sectorielle ou disciplinaire. D'autres méthodes doivent être développées. Les guides méthodologiques destinés à une gestion durable des milieux littoraux se sont multipliés depuis une dizaine d'années (UNESCO, 1997 ; Scialabba, 1998). Ils recommandent vivement de prendre en compte la multiplicité des variables qui interfèrent au sein des zones côtières tant sur les systèmes naturels et leurs dynamiques que sur les systèmes sociaux et leurs tendances évolutives. Il est donc désormais largement reconnu que « Pour gérer et aménager les zones côtières de manière durable, les décideurs doivent comprendre comment s'imbriquent l'environnement naturel et les activités humaines pour former un « éco-socio-système » (Unesco, 1997).

II-10-2 ACQUIS EN MATIERE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE SUR LES LITTORAUX

Dès 1997, l'UCAD a accueilli une Chaire d'enseignement pluridisciplinaire sur « la gestion intégrée pour le développement durable des régions côtières et des petites îles ». Il convient de souligner que cet enseignement de troisième cycle est à la fois pluridisciplinaire et finalisé vers des questions de développement durable.

Les thèmes de recherche abordés jusqu'ici sont :

La biodiversité marine et côtière à travers des études sur les écosystèmes de mangrove, sur l'ichtyofaune océanique, sur l'avifaune ;

La Pollution à travers la gestion des ordures ménagères, mais aussi l'estimation des pollutions marine d'origine industrielle (exemple de la baie de Hann) ;

L'érosion littorale comme phénomène environnemental induit par les activités anthropiques et comme facteur économique et social (accroissement de la précarité, des conflits de la pression foncière...) ou comme facteur de la morphodynamique estuarienne ;

La gestion de l'eau pour l'importance de sa répartition et de sa gestion dans les dynamiques sociales et économiques locales ;

La Pêche pour l'importance de cette activité économique majeure dans la dynamique littorale ses contraintes et ses opportunités dans des zones géographiques diverses et contrastées (Saint-Louis, Dakar, Petite Côte, Saloum, Casamance).

Le tourisme dont le principal développement au Sénégal est littoral et balnéaire. Son analyse a porté sur sa répartition spatiale, son organisation (notamment sur la Petite Côte), ses retombées économiques et ses relations avec les autres activités telles que la pêche et l'agriculture.

L'agriculture première activité littorale avant la pêche et le tourisme, encore très importante à travers le maraîchage et l'horticulture, malgré la péjoration des conditions climatiques et la baisse de fertilité des sols.

Les pratiques éclairées ont constitué l'un des principaux thèmes d'étude dans le domaine social en relation avec le souci d'une gestion précautionneuse et durable ;

Les conflits d'usage qui ont été traités dans leur dimension juridique en relation avec les droits et les réglementations existantes ;

Les amas coquilliers enfin ont constitué un objet de recherche privilégié pour l'étude de la richesse patrimoniale des littoraux et la dimension historique longue des occupations humaines dans les zones côtières et estuariennes sénégalaises.

Ce bref inventaire montre la multiplicité des travaux entrepris et la diversité des thèmes abordés.

Ainsi, le littoral est devenu de plus en plus clairement un domaine prioritaire dans les différents processus de gestion des ressources et des activités nationales. Les programmes d'étude et de financements pour une meilleure gestion des littoraux se multiplient aujourd'hui. Une demande sociale apparaît pour de réelles solutions à des questions complexes de gestion ainsi que pour la formation de réels spécialistes des littoraux.

II-10-3 LES PRIORITES

Il y a à peine une quinzaine d'année il était encore légitime de penser -et d'écrire- « on ne peut pas dire que les sénégalais soient un peuple tourné vers la mer »¹. Depuis le développement des marchés d'exportation de la pêche, le développement du tourisme, l'explosion de l'immobilier littoral,

¹ A. BA, 1993. – La gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal. In 3 Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal » Actes de l'Atelier de Gorée des 27-29 mars 1992, A.T. Diaw et al. UICN, ISRA, IFAN : 15-22.

l'extension considérable des espaces urbanisés côtiers font que la gestion des ressources et des espaces littoraux et marins est devenue une urgence nationale.

On sait qu'une approche sectorielle de cette question ne peut aboutir à des solutions viables. La gestion intégrée n'est pas seulement une expression, c'est aussi une contrainte forte. Par exemple en milieu littoral, le développement de la pêche n'est pas indépendant du développement du tourisme qui revendique les mêmes espaces, les mêmes forces de travail, les mêmes ressources en bois, en eau, en paysages...

Un processus de gestion intégrée des littoraux est donc à construire. A cette tâche de fond se surimposent d'autres tâches plus urgentes. En effet, l'évolution des activités littorale et côtière est telle que certains travaux doivent être entrepris sans attendre. Il s'agit de permettre les prises de décisions urgentes que réclament les évolutions catastrophiques de certains écosystèmes, de certaines ressources ou de certaines situations. Nous évoquerons ici trois priorités environnementales majeures:

II-10-3-1 L'érosion côtière

Ce phénomène atteint des proportions inquiétantes sur la façade maritime du fleuve Sénégal, du nord de la presqu'île du Cap Vert jusqu'à la frontière gambienne. Les conditions naturelles se mêlent ici à de mauvaises pratiques humaines. Des études précises de dynamique sédimentaire doivent être entreprises pour assurer un point de référence précis, pour une juste évaluation de l'impact des usages actuellement fait des sédiments sableux et pour l'identification précise des solutions adaptées.

II-10-3-2 L'explosion du bâti

La croissance urbaine est très forte au Sénégal. Le taux de croissance de la région de Dakar est de 3,9% soit pratiquement une fois et demie la croissance démographique nationale. Cette concentration de la population en milieu urbain s'est faite jusqu'ici sans grand souci de préservation environnementale. Un bilan de l'impact urbain sur la dégradation des écosystèmes et l'empoisonnement des milieux doit être entrepris rapidement pour que des solutions adaptées soient recherchées. Cela concerne aussi bien la destruction de milieux protégés que l'empoisonnement des nappes phréatiques, la pollution atmosphérique l'épandage de produits toxiques, l'artificialisation des milieux côtiers, etc. Le développement du bâti touristique et de loisir vient compléter le tableau et contribue à exporter en milieu rural ou rurbain le même cortège de nuisances.

II-10-3-3 Les pollutions et la qualité des eaux

Le développement explosif des villes côtières, à commencer par Dakar, n'est pas sans conséquence sur la qualité des eaux que celles-ci soient douces, phréatiques ou marines. Les pollutions chimique et fécale des nappes, les prélèvements excessifs et la progression du biseau salé à l'intérieur des terres sont à imputer à une urbanisation peu soucieuse de la gestion de ses eaux usées, de ses déchets et du contrôle des normes de sécurité sanitaire. Les rejets urbains et industriels en mer ont des effets en cascade sur la dynamique des écosystèmes côtiers et sur la qualité des produits de la mer. Ils favorisent le gaspillage des ressources nationales et contribuent également à obérer le développement touristique. Les impacts économiques, sociaux et de santé publique de ces nuisances doivent être évalués et des solutions proposées.

Outre ces grandes priorités il convient d'évoquer également les questions soulevées par la préservation de la biodiversité des milieux forestiers, et tout particulièrement des milieux de mangrove dont la fragilité, bien que connue, est souvent mal évaluée.

Un autre sujet de préoccupation est celui des perspectives de développement touristique. Si l'expansion de l'industrie du tourisme constitue une potentialité de développement économique pour

le pays, elle génère également un ensemble de risques environnementaux, sociaux et culturels qu'il convient de préciser. La différenciation des formes de tourisme désormais pratiquées au Sénégal offre l'opportunité d'évaluer leur impact et d'envisager d'autres formes d'une nécessaire politique de pilotage de cette activité à moyen terme.

Le développement incontrôlé de la pêche et les menaces subséquentes de dilapidation des stocks nationaux de poissons constitue également une préoccupation majeure. Au lieu d'être une activité préservée du fait de l'importance qu'elle revêt pour l'économie nationale la pêche est dans les faits trop souvent considérée comme une activité refuge. Une analyse moins centrée sur le poisson mais plus soucieuse des déterminants sociaux et économique est souhaitable pour envisager les mesures adaptées à une gestion plus rationnelle d'un secteur particulièrement dynamique.

Enfin, la dimension juridique et législative ne doit pas être omise. Tout particulièrement au moment où le processus de décentralisation prend de l'ampleur et vient s'articuler avec les politiques de responsabilisation des populations rurales. Une relecture des textes destinés à l'établissement de la durabilité écologique, de l'équité sociale et de la croissance économique doit être faite à la lumière des orientations de développement durable et de démocratisation adoptées par le Sénégal. Cela conduit à des questions telles que : Quels sont les modes possibles de gestion des ressources par les populations locales ? Quels sont les apports de la tradition et de ses pratiques avisées ? Comment la décentralisation peut redynamiser ces pratiques dans une dynamique de développement et un souci de durabilité ?

II-10-4 MATERIEL SOLLICITE

- Un enregistreur des marées et de la houle : Houlographe 3D Wave, Falmouth Scientific
- Une ADCP : mesures de vitesses, de profondeur
- Données satellitaires différentes dates
- Equipement informatique : deux ordinateurs portables

II-10-8 BUDGET : ?

II-11 EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE DES IMPACTS DE LA MOUSSON

Aminata NDIAYE (PI- Département Géographie UCAD), Grégoire Leclerc (CIRAD/PPZS), Magatte Ba (CSE).

Les aspects socio-économiques de la mousson seront déclinés selon trois volets que nous détaillons séparément car ils impliquent des compétences et des équipes distinctes:

- 1) Impact de la mousson sur les conditions de vie des sociétés Sénégalaises
- 2) Macro-économie
- 3) Assurances agricoles

II-11-1 IMPACT DE LA MOUSSON SUR LES CONDITIONS DE VIE DES SOCIÉTÉS SÉNÉGALAISES

II-11-1-1 Introduction

Les fondements de l'économie sénégalaise résident sur l'agriculture, notamment sur celle sous pluie. Or, depuis la fin des années 1960, le Sénégal, à l'instar de tous les pays de l'Afrique de l'Ouest, connaît une sécheresse importante et quasi continue. Celle-ci a affecté l'ensemble du cycle de l'eau entraînant ainsi de graves conséquences pour l'agriculture et la sécurité alimentaire.

Cette situation de « crise » climatique et socio-économique est accentuée par la croissance exponentielle de la population avec ses corollaires directs : la réduction des superficies laissées en jachère, l'installation de la famine, l'exode des ruraux vers les centres urbains qui réceptionnent l'aide alimentaire internationale et l'accentuation de la pauvreté.

Ainsi, malgré les avancées significatives des recherches qui tentent de comprendre les mécanismes à l'origine de la variabilité climatique, celle-ci persiste. C'est dans ce contexte que le Programme AMMA, s'est fixé comme objectif de proposer une nouvelle approche destinée à améliorer les capacités de prévision de la mousson africaine.

Les imbrications entre sciences climatiques et sciences humaines sont prises en compte dans cette nouvelle approche qui semble comprendre, qu'une meilleure connaissance de la répartition spatio-temporelle des précipitations demeure une nécessité socio-économique. Cela davantage encore dans un pays comme le Sénégal, où, comme déjà évoqué, l'économie est fortement tributaire des rendements de l'agriculture et du pastoralisme.

Les famines qui ont frappé les pays sahéliens dans les années 1970 et 1980 montrent que l'instabilité pluviométrique en zone semi-aride peut avoir un effet dramatique sur les ressources en eau et sur l'agriculture.

Au Sénégal, la détérioration des conditions climatiques renforcée par la baisse sensible de la fertilité des sols a engendré une évolution chaotique de la production agricole, qui est, rappelons le, essentiellement sous pluie. Dès lors, le bilan vivrier, tributaire de la production céréalière est de plus en plus déficitaire avec un taux de couverture, par endroit, inférieur à 34 % ; soit une période de soudure de plus de 8 mois par an. Ainsi, sachant que la proportion de la population en dessous du

seuil de pauvreté est de l'ordre de 65,3 %, les besoins alimentaires restent de moins en moins satisfaits. Cela davantage encore dans les zones à risque alimentaire.

Un tel diagnostic, montre sans équivoque, l'imbrication des facteurs climatiques et socio-économiques. D'où l'urgence qui incombe aux scientifiques de s'impliquer davantage dans les recherches de solutions à cette crise structurelle. Cela d'autant que les bouleversements observés annoncent, la désarticulation de tout un système dont le dépérissement du mode de vie communautaire caractéristique du monde rural.

Au regard de tous ces faits, nous pouvons affirmer que la meilleure connaissance des paramètres de la pluviogénèse, est plus qu'un besoin ; c'est une nécessité sociale. Le Programme AMMA en s'inscrivant dans cette perspective globale de la recherche, semble comprendre cet état de fait. Il offre, dès lors, au groupe Evaluation socio-économique l'opportunité de s'impliquer dans une telle problématique au Sénégal et en Afrique de l'Ouest.

II-11-1-2 Objectif principal

Le but principal de cette étude est d'abord d'appréhender les incidences des modifications climatiques récentes sur les activités des sociétés humaines au Sénégal. Il s'agira donc d'apprécier les changements ayant affecté les activités socio-économiques. Cette évaluation mettra surtout l'accent sur les conséquences de la variabilité climatique qui affectent les conditions de vie des populations.

Les activités des paysans étant très dépendantes des précipitations, une connaissance fine de l'influence des paramètres climatiques sur les productions sera d'une grande utilité. Elle aidera en effet à mieux les planifier et à prendre des mesures nécessaires pour y faire face.

II-11-1-3 Objectifs spécifiques

En plus d'amener à mieux comprendre l'interdépendance qui existe entre facteurs physiques et facteurs humains, cette recherche se propose de mettre en évidence la nécessité sociale d'une meilleure connaissance de la pluviométrie.

Cela implique obligatoirement une évaluation approfondie de :

- l'évolution naturelle de la démographique ;
- la mobilité de la population (flux migratoires intérieurs et extérieurs) ;
- l'évolution des productions et des rendements de l'agriculture et de l'élevage ;
- des modes de gestion des ressources (eau, pâturages, bois, forêts, etc.) ;
- des modes de transformation et de la diversification des produits agricoles et pastoraux ;
- l'accentuation de la pauvreté à travers une recherche d'indicateurs ;
- des infrastructures de base (accès à l'eau potable, assainissement, réseau routier, pistes de production, électricité, etc.) ;
- des équipements familiaux, notamment en milieu rural ;
- des stratégies mises en œuvre pour lutter contre la pauvreté ;
- l'accès au crédit ;
- le sous emploi en milieu rural ;
- les possibilités d'accès aux soins de santé primaires (suivi vaccinal, médicaments disponibles...).

Les objectifs spécifiques consistent d'abord en l'élaboration de modèles prédictifs d'adaptation à la variabilité climatique.

Elles concernent également la recherche-développement à travers :

- la diffusion des résultats de recherche ;
- la sensibilisation des acteurs au développement par rapport aux résultats obtenus par la recherche ;
- l'implication des chercheurs en ce qui concerne les problèmes identifiés et les solutions proposées.

II-11-1-4 Méthodologie

La démarche méthodologique comporte trois (03) phases essentielles.

Phase1 : Collecte de données et constitution d'une banque de donnée numérique.

Cette première étape concerne la recherche documentaire et la collecte d'informations. Cette phase préliminaire doit permettre d'initier le thème de recherche à travers la littérature existante.

La collecte de données géographiques et les enquêtes de terrain concernent les données socio-économiques (productivité, rendements agricoles...), démographiques (densités de population, dynamique naturelle et mouvements migratoires...)

Des images satellitaires constitueront la banque de données spatiales permettant d'étudier l'expansion des sites urbains, le recul des terres en jachère, etc.

Les enquêtes terrain permettront, par la suite, de mieux apprécier les impacts des phénomènes analysés (aspects socio-économiques, démographiques, culturels) et par conséquent de valider l'information

Phase 2 : Traitement par méthodes quantitatives, SIG, et modélisation.

Cette seconde étape consiste au traitement des données quantitatives avec élaboration d'un Système d'Information Géographique et une proposition de modèles prédictifs.

Le traitement des données de base, concernera l'exploitation de l'information recueillie sur le terrain et/ou dans des institutions spécialisées mais aussi, le traitement de l'information spatiale.

Cette phase capitale fait appel à la télédétection et au traitement de données par les méthodes quantitatives. Un SIG (qui nécessite une numérisation de cartes thématiques), ainsi que des analyses statistiques permettront la spatialisation et le suivi spatio-temporel des paramètres relevés ponctuellement sur le terrain

La constitution d'une base d'information géographique permettra enfin une analyse des interactions entre les paramètres (d'origine, de nature et de structure diverses) pris en considération.

Cette inter-comparaison de données hétérogènes sera suivie d'un traitement géo-relationnelle de l'information spatiale et thématique. D'abord à travers l'intégration des informations au sein d'une banque de données (sous format numérique), ce qui permet de surmonter les contraintes de stockage

et de gestion. Ensuite, dans une perspective d'analyse spatiale et de recherche d'expressions synthétiques d'éléments pertinents pour l'élaboration des modèles prédictifs qui seront proposés.

Phase 3 : Publication des résultats et validation terrain.

En dernier lieu, il s'agira d'une publication des résultats obtenus et de leur application effective sur le terrain. Une validation des modèles sur l'ensemble du Sénégal constitue cependant l'ultime perspective des travaux envisagés.

II-11-1-5 Résultats attendus

Sans être exhaustive, la liste suivant fait état de quelques résultats attendus qui concernent notamment :

- le développement de stratégies de lutte contre la pauvreté à travers une meilleure gestion des terres ;
- une gestion participative des populations dans l'utilisation des ressources naturelles et des infrastructures de base ;
- une meilleure organisation concernant l'accès aux services de santé ;
- une incitation à la scolarisation ;
- l'élaboration de micro-projets dans une perspective de développement durable ;
- l'identification des groupes vulnérables en vue d'actions d'urgences ;
- l'évaluation des mouvements migratoires, (exode rural et migration internationale),
- le suivi de la production agricole, et évaluation des besoins par rapport à l'évolution démographique,
- élaboration de modèle de réhabilitation de certaines ressources naturelles (stockage d'eau dans les mares notamment pour l'irrigation...),

Ces résultats aboutiront à des propositions de stratégies susceptibles d'aider à surmonter au mieux les difficultés liées aux contraintes climatiques, dans la perspective d'une utilisation rationnelle des ressources naturelles aux fins d'un développement durable.

Les résultats des recherches seront délivrés sous formes de supports cartographiques, de figures et tableaux statistiques... Une banque de donnée sous format numérique sera par conséquent disponible pour de futurs utilisateurs.

II-11-2 MACRO-CONOMIE²

II-11-2-1 Introduction

Dans la majorité des pays à climat aride ou semi-aride, la production, le traitement et la distribution de l'eau ont toujours été au centre des préoccupations des collectivités et des autorités gouvernementales. L'eau, source de vie et de richesse, fait l'objet d'une attention particulière puisque sa rareté relative force les utilisateurs, c'est-à-dire les ménages, les industriels et surtout les agriculteurs à se partager une ressource dont ils ont tous cruellement besoin. Afin de réduire cette dépendance et de satisfaire d'une façon régulière les besoins des particuliers et des collectivités, les autorités gouvernementales ont été forcées de consacrer des investissements importants pour accroître la production d'eau et veiller à sa distribution entre

² Ce texte est largement inspiré de Decaluwé, B, Patry, A, et Savard L., Quand l'eau n'est plus un don du ciel : un MEGC appliqué au maroc. Cahiers de recherche 9716 Département d'Economie, Université Laval. Décembre 1997.

tous les utilisateurs³. Il ne faut pas non plus oublier les stratégies qui tiennent en compte la saison des pluies pour l'optimisation de la ressource eau pour la productivité agricole, que ce soit celle des cultures ou le pastoralisme.

Considérant bien souvent l'eau comme un bien public, les utilisateurs, en particulier les producteurs agricoles, se sont souvent objectés à l'imposition d'une redevance pensant que, si elle doit exister, celle-ci doit être minime. Ils pensent que les coûts inhérents à la construction de barrages et au développement et à l'entretien des réseaux de distribution d'eau devraient être pris en charge par l'état et que tous les utilisateurs devraient avoir libre accès à cette ressource. Des politiques de gestion de la demande par le biais d'une régulation par les prix ne sont donc pas populaires. C'est pourquoi qu'on constate dans la majorité des pays que le cœur de la problématique se situe au niveau du prix de l'eau et en particulier au niveau de la redevance souvent dérisoire imposée aux producteurs agricoles. Au Sénégal, si la mise en place de forages en zones sèches répond à un objectif politique d'intensification de l'agriculture doublé de celui de sédentariser les pasteurs, l'impact de cette intensification sur le prix de l'eau n'a jamais été évalué. Il est fort possible que la politique d'intensification résulte en une dépendance plus forte des agriculteurs sur la saison des pluies et donc une plus grande vulnérabilité, mais aussi en une distorsion dans la structure des prix conduisant nécessairement à un usage sous optimal de la ressource.

La plupart des études qui ont abordé la problématique de l'eau sous l'angle d'une meilleure gestion de la demande ont étudié les questions de tarification du simple point de vue d'une analyse en équilibre partiel en évitant ainsi de prendre en considération les mécanismes d'interdépendance générale et les effets de rétroaction des décisions des agents sur la structure de la production et de la demande. Nous croyons que cette vision est réductrice et nous nous proposons d'étudier les conséquences de la distribution de la pluviométrie et de la tarification de l'eau sur l'allocation des ressources et le bien-être collectif dans un cadre d'équilibre général, afin de bien saisir les relations d'interdépendance qui existent entre les agents. Nous proposons de construire un modèle d'équilibre général calculable (MEGC) pour mieux capter les caractéristiques particulières de ce secteur et notamment l'impact réel de la pluviométrie sur la totalité du secteur agricole etc.

II-11-2-2 Objectifs

Construction d'un modèle d'équilibre général calculable de la ressource eau pour le Sénégal.

II-11-2-3 Méthodologie

Il s'agira d'abord de construire le modèle dans GAMS et de le caler avec des données sur la pluviométrie, l'hydraulique, et l'agriculture. Ensuite nous testerons le modèle avec les données recueillies pendant les périodes EOP et SOP de AMMA. Ce travail se fera en partenariat avec le Département d'Economie de l'Université de Sherbrooke (Canada).

³ C'est le cas des infrastructures de puits et forages dans le ferlo sénégalais.

II-11-3 ASSURANCES AGRICOLES

II-11-3-1 Introduction

Le Titre III de la Loi d’Orientation Agricole du Sénégal, lequel s’intéresse aux « Stratégies de Développement Agricole et Rural » dispose de sept chapitres relatifs à la réforme foncière, aux filières et à la régulation des marchés, à la politique de développement de l’élevage, à la maîtrise de l’eau, au développement des infrastructures et des services publics en milieu rural, à la promotion de l’équité sociale et à la protection contre les calamités naturelles et les risques liés aux activités agricoles. Dans le volet socio-économie du programme AMMA Sénégal nous nous intéressons au Chapitre 12 de la LOASP: « Protection contre les calamités naturelles et les risques liés aux activités agricoles », et plus particulièrement à l’article 51 qui stipule: « L’Etat, en concertation avec les organisations professionnelles agricoles, définit et met en œuvre une politique de soutien aux assurances agricoles, afin de sécuriser les productions, les revenus et les équipements. »

Si le Sénégal ne s’est pas encore doté d’une politique d’assurances agricoles, c’est en partie en raison de la grande variabilité, tant temporelle que spatiale, du climat. Avec la courte durée de la saison des pluies, l’impact de cette variabilité est amplifié, ce qui rend extrêmement risquée et coûteuse la mise en œuvre d’un système assurances agricoles. La capacité nationale en termes de modélisation du climat et des rendements agricoles, qui sera renforcée dans le cadre du programme AMMA, sera mobilisée pour évaluer la faisabilité et les conditions de mise en œuvre de l’article 51 de la LOA.

II-11-3-2 Objectifs

Réaliser une étude de faisabilité d’un projet d’assurances agricoles au Sénégal qui s’appuierait sur la modélisation des processus climatiques.

II-11-3-3 Méthodologie

Il s’agira surtout de quantifier et de spatialiser les risques climatiques et d’estimer les probabilités de pertes de productivité agricole. Ce projet capitalisera surtout sur les résultats des programmes agriculture et pastoralisme. En période LOP et EOP des analyses de séries historiques du climat et de la productivité agricole et à l’aide alimentaire seront réalisées, en plus de débats visant à évaluer les perceptions des populations sur les questions de l’incertitude et du risques et les modalités de mise en œuvre du concept d’assurances au niveau local. En période SOP des enquêtes seront menées auprès d’un échantillon représentatif des différents secteurs agricoles du Sénégal, pour lier les pertes agricoles à la distribution de pluies mesurée pendant la EOP et SOP.

II-11-4 RESSOURCES ET COMPETENCES DANS LA THEMATIQUE

Volet1 :

Volet 2 :

Volet 3 :

II-11-5 BUDGET

x 1000 CFA	Sollicité	Contrepartie	TOTAL
Personnel du projet		50,000	50,000
Consultants	5,000		5,000
Appui administratif	5,000	5,000	10,000
Voyages	10,000	5,000	15,000
Sous-contrats	5,000		5,000
Bourses d'étude	7,500	2,500	10,000
Formation (groupes)	2,500	2,500	5,000
Réunions, conférences	2,500	2,500	5,000
Consommables	2,500	2,500	5,000
Equipement	3,500	5,000	8,500
Location de bureaux	500	1,000	1,500
Entretien	1,000	2,500	3,500
Rapports	1,000	500	1,500
Communication (internet, poste, etc..)	1,000	1,000	2,000
Hospitalité	500		1500
TOTAL	52,500	80,000	132,500

II-11-6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, (1999). *Evolution et variabilité du climat* (chap 5), Vol. 12, AIC.498 p.

ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, (2000). *Risques et contraintes climatiques*. Vol. 13, AIC.573 p.

ASSOCIATION INTERNATIONALE DES SCIENCES HYDROLOGIQUES (1998). *Variabilité des Ressources en Eau en Afrique au XX ème Siècle*. Publication n° 252, AISH, 462 p.

BOUGUERRA, M. L. (1999). *L'état de l'environnement dans le monde*, p. 7.

BROWN et al. (1992), *Le Défi Planétaire*, Nouveaux Horizons 193 p.

BROWN et al. (2001). *L'Etat de la Planète 2001*. Economica, 223 p.

DECALUWE, B, PATRY, A, et SAVARD L., Quand l'eau n'est plus un don du ciel : un MEGC appliqué au maroc. Cahiers de recherche 9716 Département d'Economie, Université Laval. Décembre 1997

DUBRESSON A., MARCHAL J.Y., RAISON J.P., (1994) : *Les Afriques au Sud du Sahara*, Belin-Reclus, 480 p.

GLOBAL CHANGE, (1997). Components and drivers of global change, *The International Geosphere-Biosphere Programme IGBP Science n°1*, study of the International Council of Scientific Unions (ICSU), Stockholm, Sweden.

HOROWITZ M. M., NIASSE M. et al., 1990 : *Suivi des activités du fleuve Sénégal*, Rapport final intégré, Institute for Development Anthropology, 375 p.

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, (1991). Actions pour combattre le réchauffement mondial et le changement du climat. Bulletin *PNUE*, journée mondiale pour l'environnement 1991.

REPUBLIQUE DU SENEGAL, (1997). *Plan National d'Action pour l'Environnement*. CONSERE 158 p.

II-12 PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES LIES À LA MOUSSON

Soussou Sambou (PI) (Labo d'Hydraulique, Département de Physique/UCAD); Alioune Kane (Département de Géographie, UCAD), Honoré Dacosta (Département de Géographie, UCAD), Raymond Malou (Département de Géographie, UCAD)

II-12-1 PROBLEMATIQUE

Le bassin du fleuve Sénégal, à l'instar de toute la bande intertropicale, a connu un bouleversement climatique depuis les années 1970. Ce bouleversement se traduit par une tendance générale à la baisse des précipitations, un déficit pluviométrique marqué, une variabilité climatique qui se traduit par une irrégularité interannuelle des précipitations.

Ce déficit pluviométrique a entraîné une forte détérioration du système humide. Dans la basse vallée, les effets de cette désertification ont été accentués par une pression anthropique forte sur le milieu naturel, pour la satisfaction des besoins humains, mais aussi animaux.

Les crues du fleuve Sénégal, essentiellement fluviales, ont fortement baissé ; des déficits extrêmes ont été enregistrés. Les surfaces inondées annuellement dans la vallée ont diminué, entraînant une dégradation de la végétation.

Cette sécheresse prolongée a également favorisé une modification de l'occupation de l'espace : les zones basses asséchées suite à la faiblesse de la crue sont devenues des zones d'extension urbaine, exposant ainsi les populations aux fréquents débordements du fleuve lors des crues exceptionnelles.

Pour rendre l'agriculture moins tributaire des aléas climatiques et mieux la sécuriser, l'irrigation a été développée, particulièrement dans la basse vallée. De nombreux ouvrages hydro agricoles ont ainsi été réalisés. L'intensification agricole a été menée à grand renfort d'engrais et de pesticides. Elle a favorisé l'édification de périmètres irrigués de diverses tailles séparés par de petites diguettes. Ce type d'aménagement a favorisé la dégradation des conditions hydrologiques dans certaines zones inondables. Les eaux déjà utilisées sont fortement chargées et constituent un danger pour la nappe phréatique.

La crue provient essentiellement du bassin amont constitué par les bassins du Bafing, du Bakoye et de la Falémé.. Si le Bafing est contrôlé par le barrage de Manantali, les autres affluents, Bakoye et surtout Falémé sont des cours d'eau naturels. La gestion de Manantali serait facilitée par une meilleure connaissance de la formation de la crue en amont du barrage. Les inondations sont devenues très fréquentes et catastrophiques, dans toute la vallée, menaçant la sécurité des populations et des biens matériels, en particulier les voies de communications, qui sont incontournables pour le développement socio économique dans la vallée. Les cours d'eau non contrôlés ont une contribution très importante dans les écoulements dans la vallée.

L'abondance du flux de matières particulaires et dissoutes provenant de l'érosion mécanique provoque un ensablement des aménagements hydro agricoles réduisant ainsi fortement leur capacité de stockage.

Le bassin versant du Ferlo situé dans la zone sahélienne joue un rôle capital dans l'économie sénégalaise : il englobe le bassin arachidier et la zone sylvopastorale. L'importance de ce bassin

versant repose sur l'agriculture et l'élevage qui sont tributaires de la disponibilité des ressources en eau reposent sur une disponibilité de la ressource en eau, aussi bien de surface que souterraine.

II-12-2 JUSTIFICATIFS

Dans ce contexte de déficit pluviométrique prolongé, de modification des écosystèmes végétaux et de changement de l'occupation des sols, d'urbanisation anarchique, d'utilisation de plus en plus poussée de l'irrigation, de réalisation intense de petits aménagements hydro - agricoles, et d'une artificialisation poussée du bassin versant du fleuve, la gestion de la ressource en eau de ce cours d'eau devient une opération très complexe qui nécessite une approche pluridisciplinaire.

Cette gestion doit impliquer la recherche, aussi bien fondamentale qu'appliquée afin de mettre en évidence l'impact du déficit pluviométrique sur la disponibilité de la ressource en eau et les écosystèmes naturels, d'identifier les stratégies d'adaptation possibles et leurs conséquences sur l'environnement, l'hydrologie et l'hydrogéologie. Tout ceci doit contribuer à la mise au point d'un outil d'aide à la décision.

II-12-3 OBJECTIFS GLOBAUX

Il s'agit de comprendre les mécanismes physiques qui sous tendent les processus hydrologiques à l'origine des problèmes que connaît la vallée du fleuve Sénégal, et d'en déduire un outil de simulation de la génération et de l'évolution de ces processus. On étudiera en particulier les mécanismes

- des transferts hydriques et de charge et les aspects de qualité des eaux associés
- de formation et de propagation de la crue et des phénomènes d'érosion et de transport associés sur le fleuve Sénégal
- d'infiltration, de ruissellement, d'érosion et de transports associés sur un petit bassin versant de recherche expérimentale et sur le fleuve Sénégal

II-12-4 OBJECTIFS SPECIFIQUES

Pour atteindre ces objectifs globaux, il s'agira :

- De caractériser le mode des transferts hydriques ;
- de faire le bilan des solutés des zones de charge et aux zones d'évacuation ;
- d'étudier l'effet de l'irrigation sur la qualité des eaux ;
- d'identifier les usages possibles des différentes ressources hydriques ;
- D'étudier l'ampleur des changements du régime hydrologique du cours d'eau en relation avec la variabilité climatique, la précarité des saisons pluvieuses et la disponibilité ;
- De Suivre l'évolution spatiale et temporelle de la crue et définir de manière quantitative l'inondation annuelle, les flux d'eaux lâchés et leur devenir dans la vallée ainsi que les phénomènes de transport associés ;
- d'identifier les causes de l'inondation dans la vallée ;
- de caractériser les surfaces des sols et leur évolution suite à l'aridification des terres ;
- de quantifier et de caractériser la sédimentation dans les aménagements hydro agricoles et plus généralement dans les dépressions, cuvettes et mares ;

- de caractériser l'évolution spatiale et temporelle des événements pluvieux et leur influence sur l'infiltration, l'érosion, et les transports solides sur les versants des petits bassins (étude de cas sur le bassin versant de recherche expérimentale) ;
- Caractériser des événements pluvieux (courbes intensités durée fréquences) ;
- Simuler le fonctionnement hydrologique du bassin l'hydrodynamique de la nappe d'eau souterraine ;
- Simulation de la formation et de la propagation de la crue.

II-12-5 METHODOLOGIE

- La connaissance du milieu physique passe par une étape de caractérisation physique et physiographique du milieu à l'aide de cartes et d'images satellitaires (topographie fine, images satellitaires)
- L'estimation des écoulements se fera à travers des mesures de débits (cours d'eau) et de niveaux (mares, dépressions, cuvettes, aménagements ou périmètres hydro agricoles)
- L'étude de la génération des écoulements sur le bassin versant (ou de la dynamique des mares) et les phénomènes de transport associés nécessite des mesures de processus hydrologiques : infiltration, ruissellement, érosion et transports solides
- La réalisation d'un bilan sédimentaire et l'étude des impacts morpho - sédimentaires entraîne la réalisation de mesures de débits solides, de MES et de turbidité,
- La caractérisation des transferts hydriques et la détermination des différents modes de recharge (fluviale, drainage) se fait à travers des observations piézométriques (niveau statique de la nappe) l'échantillonnage des eaux et sols.
- Le bilan des solutés se fait par analyses chimiques et microbiologiques des eaux et sols.
- La progression spatiale de la crue et de l'inondation annuelle se fait à partir d'images satellitaires annuelles
- Mesures de paramètres climatiques et des caractéristiques du sols et caractérisation du sol pour le calage des modèles hydrologiques conceptuels

II-12-6 RESULTATS ATTENDUS

- Caractérisation des sites retenus et définition d'un SIG
- Compréhension du fonctionnement hydrodynamique de la vallée du fleuve et de ses dépendances et simulation des interactions eaux de surface – eaux souterraines des différents modes de recharge (pluviale et dépendance) en vue de leur évaluation
- Effet de l'irrigation sur la qualité des eaux
- Compréhension et simulation de la formation de la crue et son évolution spatio-temporelle dans la vallée ; application au suivi de la progression en temps réel de l'inondation dans la vallée et des phénomènes de transports associés ; application à la gestion des côtes des plans d'eau dans les périmètres irrigués
- Quantification des matériaux charriés et des MES et impacts morphodynamiques
- Compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants (et mares) retenus et application à l'étude de la formation des écoulements et de leur prévision,
- Evolution spatio-temporelle des événements pluvieux et courbes intensités durées fréquences

II-12-7 PARAMATRES A OBSERVER ET COMPETENCES

Paramètres hydrologiques, la modélisation de la relation pluie – débit et ses applications

- Hydrologue, Hydrogéologue, géomorphologue (Sambou S., Malou R., Kane A., Dacosta H.)

Transports solides, MES,

- Géomorphologue, hydrologue (Kane A., Dacosta H., Sambou S.)

Eau souterraine, relation eau de surface eau souterraine, modèle hydrodynamique de la nappe et application

- Hydrogéologue, Hydrologue, (Malou R., Kane A., Sambou S.)

Formation et propagation de la crue et suivi de l'évolution de l'inondation annuelle

- Hydrologue, hydrogéologue, géomorphologue (Malou R., Sambou S., Kane A.,

II-12-8 COLLABORATION

Pour les modèles hydrologiques déterministe (haut bassin): USA

Pour les modèles hydrauliques IRD, ...

Pour la physique du sol (IRD,...)

Pour les modèles conceptuels IMFT (Toulouse), LTHE (Grenoble)

Pour les transports solides et les MES (Strasbourg,...)

II-12-9 CHRONOGRAMME

SOP1

PHASE 1 : Identification des sites d'intervention

Caractérisation physique et physiographique : photographies aériennes et images satellites

- Bassin du Ferlo en amont de Doundodji
- Bassin du Bafing en amont de Dakka Saïdou
- Vallée du fleuve Sénégal
- Bief Bakel – Matam (rive gauche)
- Sous bassin de Bakoye en amont de Oualia

Identification des sites de topographie fine

- Bassin du Ferlo en amont de Doundodji
- Vallée

Identification des sites d'acquisition des images satellitaires et de commande de MNT

- Sous bassin de Dakka Saïdou
- Sous bassin de Oualia
- Bassin du Ferlo

Identification du réseau piézométrique : état actuel et travaux complémentaires

- Vallée

- Estuaire

Identification du réseau pluviométrique : état actuel et renforcement

- Sous bassin du Bafing en amont de Dakka Saïdou
- Ferlo
- Sous bassin du Bakoye en amont de Oualia
- Bief Bakel Matam

Identification du réseau hydrométrique : état actuel et renforcement

- Vallée du fleuve Sénégal
- Ferlo
- Sous bassin de Oualia
- Sous bassin de Dakka Saïdou

Identification du réseau de mesure de transports solides: état actuel et renforcement

- Vallée du Fleuve Sénégal
- Estuaire
- Ferlo

Identification des sites de prélèvements d'échantillon (MES, turbidité, qualités des eaux)

- Vallée
- Estuaire
- Ferlo

Identification du réseau de mesure des niveaux des mares

- Ferlo

Identification des sites de mesures d'infiltration, d'érosion, transports solides, ruissellement

- Ferlo
- Bassin versant de recherches expérimentales

Installation de l'équipement de mesure de terrain

- Sous bassin de Oualia
- Sous bassin de Dakka Saïdou
- Ferlo
- Vallée du fleuve Sénégal
- Estuaire

PHASE 2 : 1 ère Campagne de mesures

- Ferlo
- Vallée
- Estuaire
- Bassin amont

PHASE 3 : 1^{er} Rapport de campagne

SOP2

PHASE 1 : deuxième campagne de mesures

PHASE 2 : 2^{ème} rapport de campagne

SOP3

PHASE 1 : troisième campagne de mesure

PHASE 2 : 3^{ème} rapport de campagne

PHASE 3 : 1^{er} rapport de Synthèse. Conclusion

EOP et LOP

- Suivi morphosédimentaire
- Suivi pluviométrique
- Suivi hydrologique
- Suivi piézométrique
- Suivi de la qualité des eaux (de surface et souterraine)

II-12-10 JUSTIFICATIFS DU BUDGET

II-12-10-1 Equipement scientifique de terrain et de caractérisation

Pour les déplacements locaux : (tournées de terrain)

- 1 véhicule (ou locations de véhicule)

Pour le suivi de la nappe et des niveaux des mares (Vallée, Ferlo, Estuaire)

- 1 sonde piézométrique
- 10 Thalimédes (codeurs hydrométriques automatiques) et accessoires,
- 1 tarière et rallonges,
- 5 piézomètre enregistreur Orpheus OTT...

Pour le suivi des précipitations et autres paramètres climatiques (Vallée, Ferlo, Estuaire, Haut bassin)

- pluviomètres,
- pluviographes,
- centrale Campbell et capteurs

Pour le transport solide et les MES (Vallée, Estuaire, Ferlo)

- préleveur automatique d'échantillon,
- turbidimètre,
- sédigraphe,
- sonde multiparamètre portative,
- échantillonneur portatif
- courantomètre Braystoke/MASH

Pour la topographie fine et le MNT (Estuaire, Ferlo, Vallée) :

- théodolite laser (géodimètre),

- GPS

Pour la caractérisation physique et physiographique (Estuaire, Ferlo, Haut Bassin),:

- cartographie,
- images satellites SPOT ou Landsat TM

Pour les mesures d'écoulement (Vallée, Ferlo, Estuaire)

- station hydrométrique OTT Nimbus,
- moulinet hydrologique,
- ADCP,
- station Campbell

Pour les mesures d'infiltration, de ruissellement, de rugosité, et caractéristiques physiques du sol (Ferlo, vallée) :

- batterie de tensiomètres (pression de l'eau du sol ou succion), (ou station Campbell)
- infiltromètre de Mûntz à double anneau (infiltration),
- sonde neutronique (évolution de la teneur en eau du sol),
- perméamètre à charge constante (conductivité hydraulique à saturation du sol),
- simulateur de pluie,
- déversoir triangulaire

II-12-10-2 Equipement informatique

Pour la collecte des observations (Estuaire, Haut Bassin, Ferlo, Vallée)

- 4 ordinateurs portables.
- Vota (centrale de récupération des données des stations hydrométriques et piézométriques)

Pour le traitement des images satellites, les travaux de rédaction des rapports, le calage des modèles et le calcul scientifique:

- 4 ordinateurs de bureau performants, 4 imprimantes jets d'encre, 4 imprimantes laser

Pour le traitement des photo aériennes 4 scanners

Pour les photocopies : 1 photocopieuse

II-12-10-3 Consommables

Papier pour les enregistreurs en continu

Consommable informatique (cartouches d'encre)

Bureautique (papier)

II-12-10-4 Frais de recherche

Main d'œuvre locale

Déplacements locaux (tournées de suivi et de mesure)

Installation du matériel de mesure

Achat de logiciels

Voyages scientifiques (colloques, congrès, ateliers et séminaires)

Abonnements à des journaux et revues internationaux

II-12-10-5 Formation

Bourses

Stages

II-12-10-6 Diffusion des résultats

Rapports

Ateliers de restitution

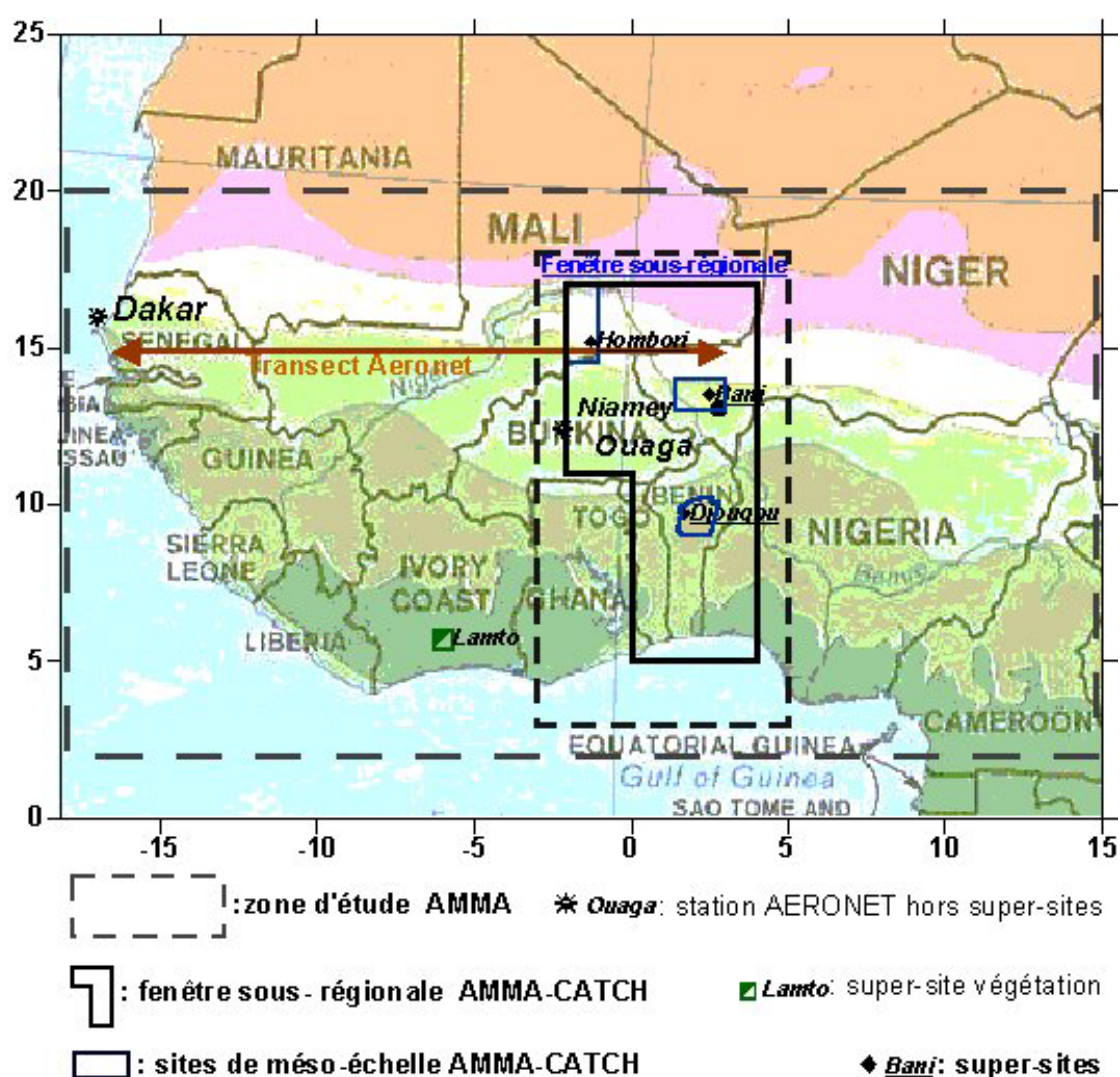
x 1000 CFA	Sollicité	Contrepartie	TOTAL
Personnel du projet		100,000	100,000
Consultants	10,000		10,000
Appui administratif	10,000	10,000	20,000
Voyages	20,000	10,000	30,000
Sous-contrats	10,000		10,000
Bourses d'étude	15,000	5,000	20,000
Formation (groupes)	5,000	5,000	10,000
Réunions, conférences	5,000	5,000	10,000
Consommables	5,000	5,000	10,000
Equipement	7,000	10,000	17,000
Location de bureaux	1,000	2,000	3,000
Entretien	2,000	5,000	7,000
Rapports	2,000	1,000	3,000
Communication (internet, poste, etc..)	2,000	2,000	4,000
Hospitalité	1,000		1,000
TOTAL	105,000	160,000	265,000

SECTION 3 : STRATEGIE D'OBSERVATIONS ET IMPLEMENTATION

III-1 ECHELE REGIONALE

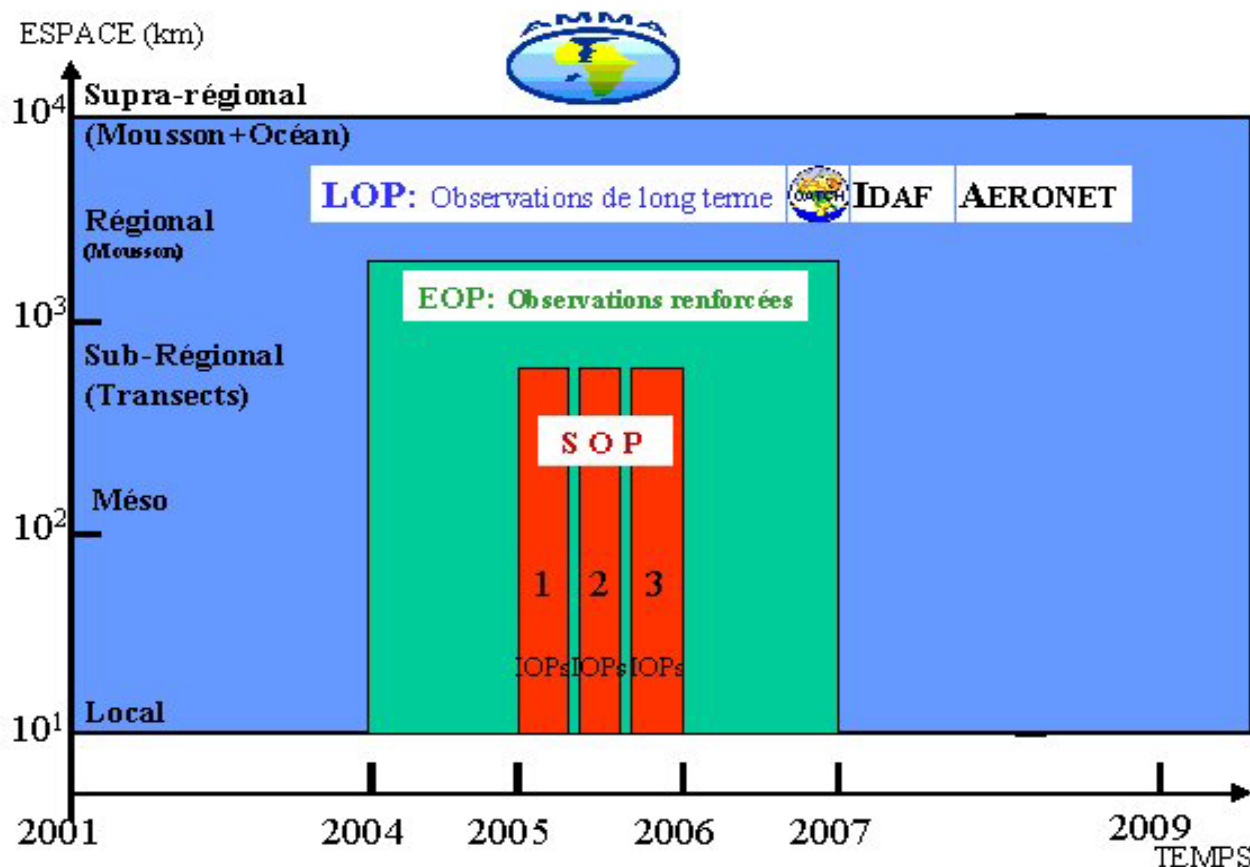
L'Afrique de l'Ouest constitue un laboratoire naturel idéal d'étude des interactions d'échelle dans la mousson : de l'échelle globale à la locale en passant par la régionale.

L'expérience régionale (voir figure) va intégrer le réseau d'observations existant sur l'Afrique de l'Ouest (archivage des données existantes et collecte) et des observations spécifiques. Les observations à long terme de différents réseaux et projets existant tels que IDAF, AERONET, CATCH, IMPETUS seront considérées.



Echelles temporelles

AMMA repose sur 3 périodes d'observations (voir figure) :



1- La période d'observations à long terme (LOP ou Long-term Observing Period) concerne la période 2001-2010. Les observations collectées durant les dernières années et non archivées seront recherchées pour l'étude de la variabilité interannuelle à décennale de la MAO. Des observations à long-terme supplémentaires seront effectuées pour documenter et analyser la variabilité interannuelle de la MAO.

La période d'observations renforcées (EOP ou Enhanced Observing Period)) est le lien entre la LOP et la SOP. Son objectif principal est de documenter sur un transect climatique le cycle annuel de paramètres de surface et atmosphériques (observations importantes mais difficiles à entretenir sur le long terme) aux échelles convective à synoptique. L'EOP s'étalera sur 3 ans (2005-2007).

La période d'observations spéciales (SOP ou Special Observing Period) se focalisera en 2006 sur des observations détaillées des processus spécifiques aux 3 phases principales de la saison des pluies : (i) SOP1 (15 mai-30 juin) : début de mousson, (ii) SOP2 (1 juillet- 14 août) : maximum de mousson (iii) SOP3 (15 août- 15 septembre) : retrait de la mousson ;

Une autre phase d'observations spéciales (SOP0) dénommée MAMMA (Multi observation of Aerosols Mixing in Africa) intéresse plutôt la saison sèche (janvier- février 2006).

III-2 ECHELLE NATIONALE

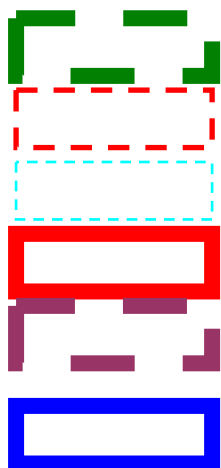
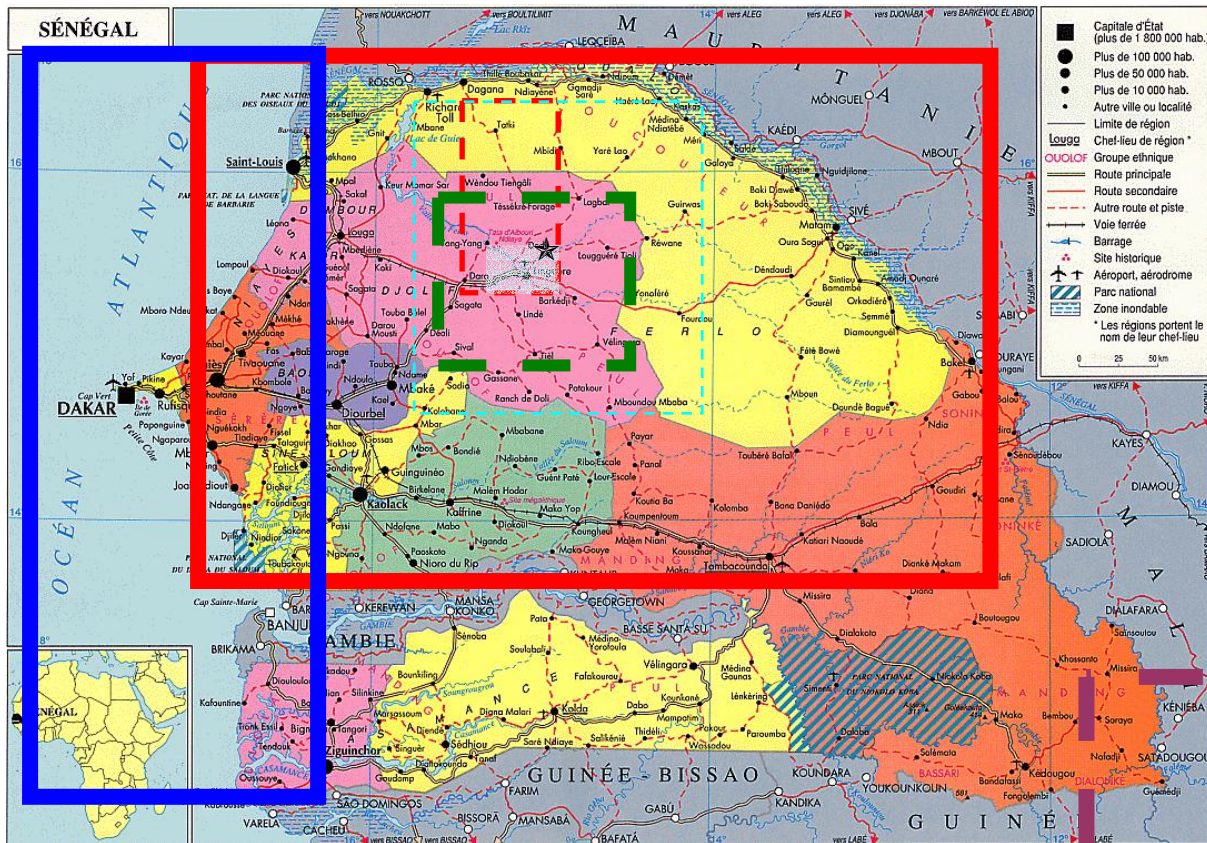
Les différentes échelles spatiales concernées en plus de l'échelle régionale Afrique de l'Ouest de la zone d'étude AMMA sont:

- Mésos-échelle et échelle de bassins versants
- Echelle synoptique (Sous- région Sahélienne et Guinée)

Les différentes zones concernées (6) sont représentées sur la figure suivante :

- i) ZAS ou Zone d'instrumentation AMMA du Sénégal
- ii) ZAP ou zone agropastorale : zone d'intérêt du programme Pôle Pastoral Zone Sèche (PPZS)
- iii) Site d'étude du groupe environnement- climat- santé : Supersite Ferlo autour du nouveau radar Doppler bande S intéresse les sous-groupes hydrologie, dynamique des MCS, aérosols, santé, pastoralisme et socio-économie.
- iv) Observatoire Roselt /Ferlo
- v) Zone Haut-Bassin du fleuve Sénégal : zone d'intérêt pour l'hydrologie
- vi) LITTOC ou zone Littoral et Océan

Les échelles temporelles sont les mêmes qu'à l'échelle régionale : LOP, SOPs, EOP. La SOP0 et la SOP3 verront une participation internationale (USA et Europe) renforcée.



Site d'étude du Groupe Santé- Environnement

Observatoire ROSELT FERLO

ZAP

ZAS

Zone d'intérêt pour les hydro dans le Haut Bassin du fleuve Sénégal

Zone LITTOC (Littoral/Océan)

★ Radar Doppler

AMMA						
INSTRUMENTATION						
	Afrique de l'Ouest	ZAS	ZAP	Ferlo	Haut Bassin	LITTOC
OP	EST Données Radar bande C, Disdro, Pluie, meteosat, vent, reanalyses DYN Synop, temp, pilots, satellite, radars, Pl,TUV, Réanalyses, , mesures aéroportées, PNT AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent DYN Disdromètre, LIS Flux, données du capteur IDAF, PNT, meteosat SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeoires, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, Données socio-économiques, occupation des sols AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux,	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent, HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la maree, asd	EST Pluie, meteosat SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeoires, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd	EST Pluie, meteosat, reanalyse, vent, pluviomètre HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd	EST Données Radar bande C, meteosat, DYN SST OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo-bathymetrie, morphologie littorale SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeoires, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares,

	<p>MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p> <p>OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometri e, Sorties modèle atmos, Topo-bathymetrie, morphologie littorale</p>	<p>donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie, morphologie littorale</p> <p>PAS Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau</p> <p>AGR Pl, T, U, Vent, flux, sortie de modele atmos</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, prévi saisonnière, sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p> <p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p>				<p>évapo AGR Pl, T, U, Vent, flux, sortie de modele atmos</p> <p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p> <p>MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p>
EOP	EST Données	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat,	EST Données Radar	EST Données Radar	EST Pluie, meteosat,	

<p>Radar bande C, Disdro, Pluie, meteosat, vent, reanalyses</p> <p>MOD</p> <p>Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p> <p>OCN</p> <p>Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie, morphologie</p> <p>AGR</p> <p>Appareil de mesure d'ETP, matériel de mise en place d'essais, pluviomètre, pyranometre, psychromètre, thermomètres</p> <p>SAN</p> <p>Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, prévi saisonnière, sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p> <p>HDR</p> <p>Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prédi saisonnière, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p>	<p>vent</p> <p>MOD</p> <p>Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p> <p>OCN</p> <p>Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie, morphologie</p> <p>AGR</p> <p>Appareil de mesure d'ETP, matériel de mise en place d'essais, pluviomètre, pyranometre, psychromètre, thermomètres</p> <p>SAN</p> <p>Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, prévi saisonnière, sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p> <p>HDR</p> <p>Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prédi saisonnière, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p>	<p>bande C, Pluie, meteosat, ven</p> <p>HDR</p> <p>Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p> <p>T</p> <p>PAS</p> <p>Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau</p>	<p>bande C, Pluie, meteosat, vent</p> <p>PAS</p> <p>Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau</p> <p>SAN</p> <p>Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p>	<p>reanalyse, vent, pluviomètre</p> <p>HDR</p> <p>Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p>	
--	--	--	---	---	--

				HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, Données socio-économiques, occupation des sols		
SOP1	EST Données Radar bande C, Disdro, Pluie, meteosat, vent, reanalyses DYN Synop, temp, pilots, satellite, radars, Pl,TUV, Réanalyses, , mesures aéroportées, PNT AER Flux,	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent DYN Disdromètre, LIS Flux, données du capteur IDAF, PNT, meteosat SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent, HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la maree, asd PAS Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent PAS Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épидémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et	EST Pluie, meteosat, reanalyse, vent, pluviomètre HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio- économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd	

<p>impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT</p> <p>MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p> <p>OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo-bathymetrie,</p>	<p>OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo-bathymetrie, morphologie littorale</p> <p>AGR Appareil de mesure d'ETP, matériel de mise en place d'essais, pluviomètre, pyranometre, psychromètre, thermomètres</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, prévi saisonnière, sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p> <p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p>	<p>saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau</p>	<p>qualité de l'eau</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p> <p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, Données socio-économiques, occupation des sols</p>		
---	--	--	---	--	--

SOP2	<p>EST Données Radar bande C, Disdro, Pluie, meteosat, vent, reanalyses</p> <p>DYN Synop, temp, pilots, satellite, radars, PI,TUV, Réanalyses, , mesures aéroportées,</p> <p>PNT AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT</p> <p>MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar,</p>	<p>EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent</p> <p>DYN Disdromètre, LIS Flux, données du capteur IDAF, PNT, meteosat</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeoires, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p> <p>AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT</p> <p>MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, PI,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p> <p>OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie, morphologie littorale</p> <p>AGR Appareil de mesure d'ETP, matériel de mise en place d'essais, pluviomètre, pyranometre, psychromètre, thermomètres</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie,</p>	<p>EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent,</p> <p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la maree, asd</p> <p>PAS Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeoires, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux</p>	<p>EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent</p> <p>PAS Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeoires, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux</p>	<p>EST Pluie, meteosat, reanalyse, vent, pluviomètre</p> <p>HDR PI, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p>	

	disdromètre, PI,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, PI, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometri e, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie,	lithometeores, PNT, prévi saisonnière, sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo HDR PI, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd		d'eau des mares, évapo HDR PI, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, Données socio-économiques, occupation des sols		
SOP3	EST Données Radar bande C, Disdro, Pluie, meteosat, vent, reanalyses DYN Synop, temp, pilots, satellite,	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent DYN Disdromètre, LIS Flux, données du capteur IDAF, PNT, meteosat SAN PI, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent, HDR PI, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques,	EST Données Radar bande C, Pluie, meteosat, vent PAS PI, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de	EST Pluie, meteosat, reanalyse, vent, pluviomètre HDR PI, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de	

radars, PI,TUV, Réanalyses, , mesures aéroportées, PNT AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, PI,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, PI, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST OCN Vent,	AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, PI,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, PI, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie, morphologie littorale AGR Appareil de mesure d'ETP, matériel de mise en place d'essais, pluviomètre, pyranometre, psychromètre, thermomètres SAN PI, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, prévi saisonnière, sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo HDR PI, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd	occupation des sols, niveau de la maree, asd PAS PI, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau	risques sanitaires, données épidémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau SAN PI, T, U, Vent, données d'entomologie, épidémiologie, de sérologie et de virologie, lithometeores, PNT, , sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo HDR PI, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, Données socio-économiques, occupation des sols	modele, données socio- économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd	
--	--	--	---	--	--

	SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo-bathymetrie,					
MAM A	<p>AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT</p> <p>MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p>	<p>AER Flux, impacteurs à cascades, particules, lidar, photomètres, PNT</p> <p>MOD Synop, temp, pilots, satellite, radar, disdromètre, Pl,TUV, Réanalyses, mesures aéroportées, flux, Pl, Onde d'est, MCS, Distribution tridim aérosols, SST</p> <p>OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometrie, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie, morphologie littorale</p> <p>PAS Pl, visibilité, T (journalière), biomasse, enquêtes, Prévisions saisonnières, sorties de modeles atmos et hydro, Prévisions de risques sanitaires, données épидémio, Rendements cultures et prix, Profondeur nappe, débits des forages, prix de l'eau, niveau des mares et qualité de l'eau</p> <p>SAN Pl, T, U, Vent, données d'entomologie, épидémiologie, de sérologie et de virologie,</p>	<p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la maree, asd</p>	<p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la maree, asd</p>	<p>HDR Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la maree, asd</p>	

	<p>OCN Vent, SST,SSS, sels nutritifs, T, U, flux, donnees courantometri e, Sorties modèle atmos, Topo- bathymetrie,</p>	<p>lithometeoires, PNT, prévi saisonnière, sortie de modèle atmos et hydro, enquêtes, Niveaux d'eau des mares, évapo</p> <p>HDR</p> <p>Pl, T, U V, Evapo, écoulements, niveau d'eau, piézométrie, qualité des eaux, Prévi saisonnière, PNT, sortie de modele, données socio-économiques, occupation des sols, niveau de la marree, asd</p>				
--	--	---	--	--	--	--

SECTION 4 : COMITE NATIONAL AMMA : COMPOSITION

PRESIDENT

Chérif DIOP
Directeur par intérim de la Météorologie Nationale
DMN, Aéroport Dakar Yoff, Dakar, Sénégal
Tél / Fax: 221 869 53 39
Email: cherifdiop@yahoo.fr

COORDINATEUR GENERAL

Amadou Thierno GAYE
Reponsable Laboratoire de Physique de l'Atmosphère S. F.
Adresse: LPA-SF, ESP /UCAD BP 5085 Dakar-Fann, Dakar, Sénégal
Tél: / Fax: 221 825 93 64
Email: atgaye@ucad.sn; atgaye@yahoo.fr

INSTITUTIONS IMPLIQUEES

Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA)
Centre d'Etude et de Recherche en Agronomie (CERAAS) de Thiès
Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD)
Centre de Recherche Océanographique de Dakar Thiaroye (CRODT)
Centre de Suivi Ecologique
Département de Géographie, Université CAD
Département de Géologie, Université CAD
Département de Physique, Université CAD
Direction de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (DGPRE)
Direction Météorologie Nationale (DMN)
Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
Institut Sénégalais de Recherche Agricole (ISRA)
Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Géomatique (LERG)
Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang (LPA-SF)
Laboratoire de Traitement de l'Information (LTI)
Université Gaston Berger de Saint-Louis (UGB)

PERSONNES IMPLIQUEES

Prénoms et Nom	Centre d'Intérêt ou activité	Organisme d'affiliation
Samba Bâ	hydrologie de surface	DGPRE
Daouada Badiane	MCS	LPASF
Mactar Camara	MCS, ondes	en thèse, LPA-SF

Honoré Dacosta	hydrologie	Département de Géographie, UCAD
Aldiouma Diallo	Epidémiologie	IRD
Samo Diatta	Précipitations, radar, TRMM	en thèse, LPA-SF
Bouya Diop	Rayonnement	UGB
Chérif Diop	Observations, prévi saisonnière	DMN
Mbaye Diop	Applications agro, précipitations	LERG / ISRA
Omar Diouf	Agronomie, couvert végétal	CERAAS
Amadou Gaye	MCS, aérosols, modélisation	LPA-SF
Ibrahima Hamza	Aérosols	EAMAC/LPA-SF
Alioune Kane	Géomorphologie	Département de Géographie, UCAD
Mariane Diop Kane	MCS, modélisation, précipitations	DMN
Fadel Kébé	Pluies, radar	LPA-SF
Grégoire Leclerc	Pastoralisme, SIG	CIRAD/LERG
Raymond Malou	hydrogéologie	Département de Géologie, UCAD
Cheikh Mbow	Végétation, aérosols	ISE/ LERG
Adama Ndianor	hydrologie de surface	DGPRES
Ababacar Ndiaye	Chimie, aérosols	LPA-SF
Aminata Ndiaye	Socio-économie	Département de Géographie, UCAD
Gora Ndiaye	hydrologie de surface	DGPRES
Mamadou Ndiaye	Agro- météorologie	DMN
Ousmane Ndiaye	Prévisions saisonnières	IRI/ DMN
Jacques André Ndione	Climatologie, climat-santé	CSE / LPA-SF
Jean Baptiste Ndong	Climatologie	Département de Géographie, UCAD
Aïda Diongue Niang	Modélisation, MCS, Observations	DMN

Pascal Sagna	climatologie, MCS	Département de Géographie, UCAD
Saïdou Sall	MCS, modélisation	LPA-SF
Soussou Sambou	Modélisation hydrologique (surface)	Département de Physique, UCAD
Tidiane Sané	Climatologie	LERG
Boubacar Sangharé	MCS, ondes, effets orographiques	en thèse, LPA-SF
Abdoulaye Sarr	Modélisation, MCS	ASECNA/ LPA-SF
Bamba Sylla	Modélisation, changements climatiques	en thèse, LPA-SF
Moussa Thiam	Observations, prévi saisonnière	ASECNA
Madiagne Thiaw	Modélisation, prévisions	ASECNA
Wassila Thiao	Modélisation, prévi saisonnière	CPC / DMN
Mamadou Watt	Observations, prévisions	ASECNA
Bamol Sow	Océanographie	LPA-SF
Awa Niang	Traitement de données	LTI
Salam Sawadogo	Traitement de données	LTI

ANALYSES MULTIDISCIPLINAIRES DE LA MOUSSON AFRICAINE (AMMA)
AFRICAN MONSOON MULTIDISCIPLINARY ANALYSIS

Plan Scientifique et d'implémentation National du Sénégal (PSN)
Senegal National Science and Implementation Plan (SENSIP)

PLAN

MOTIVATION

Structure du plan scientifique et d'implémentation national (PSN)

**SECTION 1 : CONTEXTE PHYSIQUE : SYSTEME CLIMATIQUE ET
HYDROLOGIQUE DU SENEGAL**

INTRODUCTION

I – 1 relief et sols

I –2 géologie et hydrogéologie

I-3 hydrologie

I-3-1 L'hydrologie continentale

I-3-2 L'hydrologie océanique

I-3-2-1 Les courants de dérive

I-3-2-2 Le régime hydrologique

I-3-2-3 L'upwelling côtier

I-4 CLIMAT

I –5 VEGETATION ET FAUNE

I-5-1 La végétation

I-5-2 La faune

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SECTION 2 : GROUPES THEMATIQUES ET PROPOSITIONS D'ETUDES

II-1 RESEAU D'OBSERVATION DU SENEGAL

II-1-1 LE RESEAU D'OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES

II-1-1-1 Réseau synoptique

II-1-1-1-2 Réseau d'altitude

II-1-1-1-3 Réseau climatologique

II-1-1-1-4 Réseau agrométéorologique

II-1-1-1-5 Réseau pluviométrique

II-1-1-1-6 Stations de réception de données satellitaires

II-1-1-1-7 Stations Radar

II-1-2 COLLECTE ET RETRANSMISSION DES DONNEES DE BASE

II-1-2-1 Système BLU

II-1-2-2 Système DCP/DRS

II-1-2-3 Téléphone

II-1-2-4 Tableau de disponibilité des données

II-1-3 CRITIQUES DU RESEAU ET RECOMMANDATIONS

II-2 ESTIMATION DES PLUIES PAR RADAR ET SATELLITE

Introduction

II-2-1 OBJECTIFS GENERAUX

II-2-2 OBJECTIFS SPECIFIQUES

II-2-3 METHODOLOGIE ET DONNEES UTILISEES

II-2-4 PROJETS DE RECHERCHE

II-2-4-1 Etude de la distribution granulométrique des gouttes de pluies en mer et dans la région du Fouta Djallon : Application à l'étalonnage de données radars dans la zone ouest africaine

II-2-4-2 Validation de la méthode des aires intégrales au Sénégal et dans l'ouest africain

II-2-4-3 Estimation des pluies à petites échelles de temps et d'espace à partir des données satellitaires dans l'infrarouge thermique

II-2-4-4 Validation de la méthode EPSAT pour l'estimation des pluies à de petites échelles temporelles

II-2-4-5 Validation de la méthode TAMSAT au Sénégal et dans l'ouest Africain

II-2-4-6 Analyse des propriétés structurelles des cellules convectives par approche fractale et multifractale

II-2-4 -7 Validation des sorties de modèle pour l'estimation et la prévision de la pluie

II-2-4-8 Utilisation de données radar dans un modèle conceptuel de prévision de la pluie dédié à l'hydrologie urbaine et à l'étude de la dynamique des mares temporaires.

II-2-4 -9 Etude statistique des profils verticaux de pluie par le radar spatial de TRMM

II-2-5 RESULTATS ATTENDUS

II-2-6 RESSOURCES ET COMPETENCES DANS LE DOMAINE DE L'ESTIMATION DES PLUIES

II-2-7 CHRONOGRAMME

II-2-8 COLLABORATIONS

II-2-9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II-2-10 BUDGET

II-3 DYNAMIQUE DES SYSTEMES CONECTIFS DE MESO-ECHELLE (MCS)

II-3-1 INTRODUCTION /PROBLEMATIQUE

II-3-2 BUT

II-3-3 OBJECTIFS SPECIFIQUES

II-3-4 OUTILS ET METHODOLOGIE

II-3-5 PROJETS DE RECHERCHE ET PERSONNES IMPLIQUEES

II-3-6 RESULTATS ATTENDUS

II-3-7 CHROGRAMME

II-3-8 BUDGET

II-3-9 BIBLIOGRAPHIE

II-4 AEROSOLS- CHIMIE- PROCESSUS RADIATIFS- POLLUTION

II-4-1 INTRODUCTION

II-4-2 OBJECTIFS GENERAUX

II-4-3 Proposition 1 : LA VISIBILITE CLIMATOLOGIQUE EN EPISODE CHASSE SABLE AU SAHEL

II-4-3-1 Introduction

II-4-3-2 Problématique

II-4-3-3 Objectifs

II-4-3-4 Méthodologie

II-4-3-5 Résultats attendus

II-4-4 Proposition 2 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET OPTIQUES DE L'AEROSOL SAHARIEN

II-4-4-1 Introduction

II-4-4-2 Méthodes et protocole d'observations

II-4-4-3 Résultats attendus

II-4-4-4 Références bibliographiques

II-4-5 Proposition 3 : CHIMIE DE L'ATMOSPHERE ET DE L'EAU DE PLUIE

Objectifs

II-4-6 Proposition 4 : POLLUTION (Projet POLCA)

Collaborations (propositions 1, 2, 3)

II-4-7 RESSOURCES ET COMPETENCES (Propositions 1, 2, 3)

II-4-8 BUDGET (propositions 1, 2)

II-4-9 CHRONOGRAMME

II-5 MODELISATION ET PREVISIONS

II-5-1 MODELISATION ET PREVISION ET PREVISION A COURTE ECHEANCE

II-5-1-1 Problématique

II-5-1-2 Buts

II-5-1-3 Objectifs spécifiques

II-5-1-4 Outils et méthodologies

II-5-1-5 Résultats attendus

II-5-2 PHASES DE AMMA CONCERNEES : SOP

II-5-2-1 Personnes impliquées et leur contribution

II-5-2-2 Chronogramme

II-5-2-3 Références bibliographiques

II-5-2-4 Budget

II-5-3 PREVISION SAISONNIERE

II-5-3-1 Problématique

II-5-3-2 Buts

II-5-3-3 Objectifs spécifiques

II-5-3-4 Outils et Méthodologies

II-5-3-5 Résultats attendus

II-5-4 PHASES AMMA CONCERNES : LOP, EOP

II-5-4-1 Personnes impliquées et leur contribution collaborations internationales

II-5-4-2 Chronogramme

II-5-4-3 Références

II-5-4-4 Budget

II-5-5 MODELISATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU SAHEL

II-5-5-1 Problématique

II-5-5-2 But

II-5-5-3 Objectifs spécifiques

II-5-5-4 Outils et méthodologies

II-5-5-5 Résultats attendus

II-5-6 PHASES DE AMMA CONCERNEES : LOP

II-5-6-1 Personnes impliquées et leur contribution

II-5-6-2 Collaboration internationale

II-5-6-3 Chronogramme

II-5-6-4 Références bibliographiques

II-5-6-5 Budget

II-6 MODELISATION DE L'UPWELLING SENEGALO-MAURITANIEN

II-6-1 INTRODUCTION

II-6-2 PROBLEMATIQUE

II-6-3 LES OBJECTIFS GENERAUX

II-6-4 LES OBJECTIFS SPECIFIQUES

II-6-5 LES APPROCHES UTILISEES

II-6-5-1 Impact de la météorologie sur le système d'upwelling sénégal-mauritanien

II-6-5-1-1 Problématique

II-6-5-1-2 Objectifs

II-6-5-1-3 Méthodologies proposées

II-6-5-1-3-1 Le modèle d'océan côtier

II-6-5-1-3-2 Le forçage et la validation

II-6-5-1-3-2-1 Observations directes locales

II-6-5-1-3-2-2 Observation directe globale

II-6-5-1-3-2-3 Modèles basse résolution

II-6-5-1-3-2-4 Modèles régionaux haute résolution

II-6-5-1-3-2-5 Diffusiométrie satellitaire

II-6-5-1-3-3 Les résultats attendus

Références bibliographiques

II-6-5-2 Cartographie satellitaire & Couleur de l'Océan

II-6-5-2-1 Introduction

II-6-5-2-2 Problématique

II-6-5-2-3 Les objectifs

II-6-5-2-4 Méthodologies proposées

II-6-5-2-5 Les résultats attendus

II-6-5-3 Classification et prédiction du phénomène d'upwelling

II-6-5-3-1 Introduction & Problématique

II-6-5-3-2 Objectif généraux

II-6-5-3-3 Méthodologies proposées

II-6-5-3-4 Les résultats attendus

Références bibliographiques

II-6-6 COLLABORATIONS

II-6-6-1 Collaboration Nationale

II-6-6-2 Collaboration Internationale

II-6-7 Chronogramme

II-6-8 BUDGET

II-7 IMPACTS DE LA MOUSSON SUR LE PASTORALISME.

II-7-1 INTRODUCTION

II-7-2 LES OBJETS D'ETUDE

II-7-3 OBJECTIFS

II-7-4 EQUIPE IMPLIQUE DANS LA MISE EN ŒUVRE DU PROGRAMME

II-7-5 METHODOLOGIE

II-7-5-1 L'économie pastorale : cueillette et marché

II-7-5-2 Les systèmes de production : mobilité et adaptation

II-7-5-3 La dynamique et le suivi des ressources pastorales

II-7-5-4 La gestion des parcours pastoraux

II-7-6 BUDGET

II-7-7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II-8 IMPACTS DE LA MOUSSON SUR LA SANTE

II-8-1 INTRODUCTION.

II-8-2 PROBLEMATIQUE.

II-8-3 OBJECTIFS DE L'ETUDE

II-8-3-1 Objectifs généraux

II-8-3-2 Objectifs spécifiques

II-8-4 SITE D'ETUDE

II-8-5 QUESTIONS POSEES

II-8-6 METHODOLOGIE

II-8-7 COLLABORATIONS EXTERIEURES

II-8-8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II-8-9 CHRONOGRAMME

II-8-10 BUDGET

II-9 IMPACT DE LA MOUSSON SUR LES CULTURES AU SENEGAL

II-9-1 INTRODUCTION, CONTEXTE ET JUSTIFICATIFS

II-9-1-1 Problématique

II-9-1-2 Etat des connaissances

II-9-2 OBJECTIFS

II-9-2-1 Objectifs généraux

II-9-2-2 Objectifs spécifiques

II-9-3 Méthodologie et plan de recherche

II-9-4 ACTIVITES

II-9-4-1 Expérimentations en milieu semi-contrôlé (station)

II-9-4-2 Expérimentations en milieu réel

II-9-4-3 Développement de modèle de croissance et de productivité des cultures

II-9-4-4 Enquêtes agricoles

II-9-4-5 Zonage agroclimatique

II-9-4-6 Gestion de données et SIG

II-9-5 OUTILS D'INFORMATION SPATIALE SUR LA MOUSSON

II-9-5-1 Le Front Inter tropical comme indicateur de début de saison des pluies

II-9-5-2 Information sur l'impact de la mousson sur la croissance des différentes cultures

II-9-5-2-1 Phase d'installation de la mousson

II-9-5-2-2 Phase de consolidation de la mousson

II-9-5-2-3 Information sur la prévision pluviométrique

II-9-6 RESULTATS ATTENDUS

II-9-7 BUDGET

II-9-8 CONTRIBUTION DES PARTENAIRES

Références bibliographiques

II-10 GESTION DURABLE DES RICHESSES NATURELLES LITTORALES ET CÔTIÈRES

Le littoral, région clef du développement économique pour les 30 prochaines années

II-10-1 LE LITTORAL : UN NOUVEL OBJET DE RECHERCHE ET DE GESTION

II-10-2 ACQUIS EN MATIERE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE SUR LES LITTORAUX

II-10-3 LES PRIORITES

II-10-3-1 L'érosion côtière

II-10-3-2 L'explosion du bâti

II-10-3-3 Les pollutions et la qualité des eaux

II-10-4 MATERIEL SOLLICITE

II-10-8 BUDGET : ?

II-11 EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE DES IMPACTS DE LA MOUSSON

II-11-1 IMPACT DE LA MOUSSON SUR LES CONDITIONS DE VIE DES SOCIETES SENEGALAISES

II-11-1-1 Introduction

II-11-1-2 Objectif principal
II-11-1-3 Objectifs spécifiques
II-11-1-4 Méthodologie
II-11-1-5 Résultats attendus
II-11-2 MACRO-CONOMIE
II-11-2-1 Introduction
II-11-2-2 Objectifs
II-11-2-3 Méthodologie
II-11-3 ASSURANCES AGRICOLES
II-11-3-1 Introduction
II-11-3-2 Objectifs
II-11-3-3 Méthodologie
II-11-4 RESSOURCES ET COMPETENCES DANS LA THEMATIQUE
II-11-5 BUDGET
II-11-6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II-12 PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES LIES À LA MOUSSON

II-12-1 PROBLEMATIQUE
II-12-2 JUSTIFICATIFS
II-12-3 OBJECTIFS GLOBAUX
II-12-4 OBJECTIFS SPECIFIQUES
II-12-5 METHODOLOGIE
II-12-6 RESULTATS ATTENDUS
II-12-7 PARAMATRES A OBSERVER ET COMPETENCES
II-12-8 COLLABORATION
II-12-9 CHRONOGRAMME
II-12-10 JUSTIFICATIFS DU BUDGET
II-12-10-1 Equipement scientifique de terrain et de caractérisation
II-12-10-2 Equipement informatique
II-12-10-3 Consommables
II-12-10-4 Frais de recherche
II-12-10-5 Formation
II-12-10-6 Diffusion des résultats

SECTION 3 : STRATEGIE D'OBSERVATIONS ET IMPLEMENTATION

III-1 ECHELLE REGIONALE
III-2 ECHELLE NATIONALE

SECTION 4 : COMITE NATIONAL AMMA : COMPOSITION

INSTITUTIONS IMPLIQUEES
PERSONNES IMPLIQUEES